Colli Albani: il vulcano attivo alle porte di Roma

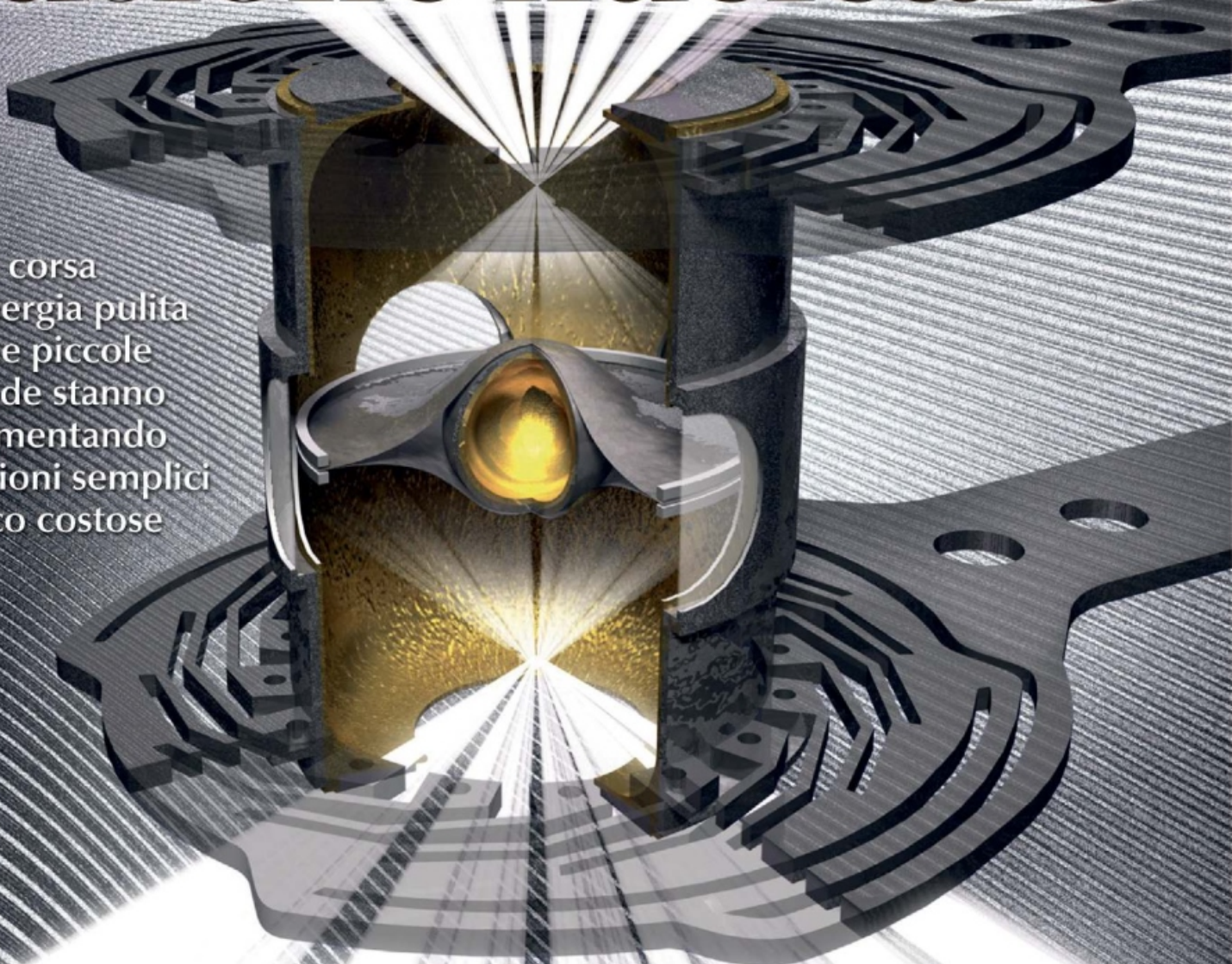
Le Scienze

Gennaio 2017 € 4,50

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

La via privata alla fusione nucleare



Nella corsa all'energia pulita alcune piccole aziende stanno sperimentando soluzioni semplici e poco costose

Innovazione

Dieci idee rivoluzionarie per cambiare il mondo

Medicina

Organi umani da corpi animali per risolvere la crisi dei trapianti

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB ROMA - PRIVATA MENSILE - NUMERO 581

Al Servizio Sanitario Nazionale

AGGIUNGIAMO

il Tuo Servizio Sanitario Personale.

Gli Italiani ogni anno pagano **570 euro** a testa per le cure private. **#laSoluzione? Assicurazione Sociale Sanità Integrativa**: la migliore protezione dalle cure private.

#laSoluzione

RBM AssicurazioneSalute

www.rbmsalute.it

Numero Verde

800 991 771

IN COPERTINA

La fusione nucleare sarebbe una fonte di energia pulita senza controindicazioni. Ma nonostante decenni di ricerca di istituzioni pubbliche, l'obiettivo è ancora lontano. Ora entrano in campo i privati. (Immagine: Stefan Schiessl/SPL/Contrasto)

Sommario

gennaio 2017 numero 581

ENERGIA

28 Le nuove frontiere della fusione

di W. Wayt Gibbs

Alcuni fisici coraggiosi, in qualche caso finanziati da miliardari, stanno esplorando strade più rapide ed economiche verso la fonte perfetta di energia pulita

INNOVAZIONE

36 Idee che cambiano il mondo

di Annie Sneed, John Pavlus e Prachi Patel

Dieci grandi progressi con le potenzialità per risolvere problemi e migliorare la vita di tutti noi

BIOLOGIA

46 Organi umani da corpi animali

di Juan Carlos Izpisúa Belmonte

Gli scienziati stanno muovendo i primi passi verso la crescita di parti di ricambio per esseri umani nel corpo di maiali, mucche e altri animali

SCIENZE DELLA TERRA

52 Il vulcano alle porte di Roma

di Fabrizio Marra

L'area vulcanica dei Colli Albani è in uno stato di quiete da decine di migliaia di anni, ma non è inattiva. E ora sta dando segni di risveglio. I recenti allarmismi mediatici, però, sono privi di fondamento

LINGUISTICA

60 Un nuovo modo di vedere il linguaggio

di Paul Ibbotson e Michael Tomasello

Gran parte della rivoluzione in linguistica operata da Noam Chomsky – compresa la spiegazione di come impariamo le lingue – è messa in discussione

EVOLUZIONE

66 Speciazione in corso

di Rüdiger Riesch

Le orche si stanno separando in specie diverse, forse perché le differenze culturali tra le popolazioni le stanno allontanando

EPIDEMIOLOGIA

74 La prova del rischio

di Giulia Frezza e Mauro Capocci

Un oncologo italiano e le sue innovazioni nello studio sperimentale dei tumori sono stati cruciali per stabilire il legame tra una specifica molecola e i tanti casi di cancro tra gli operai di Porto Marghera

NEUROSCIENZE

80 Disintossicarsi a ogni costo

di James Nestor

L'ibogaina, una sostanza contro le dipendenze che alcuni ritengono più efficace del metadone, potrebbe curare più tossicodipendenti di qualsiasi altra terapia. Oppure ucciderli

Angelo Giampiccolo/Alamy Stock Photo

Sommario

17

89

90

Rubriche

7 **Editoriale**
di Marco Cattaneo

8 **Anteprima**

9 **Lavori in corso**

10 **Intervista**
Una tuta per tornare a camminare *di Giovanni Spataro*

14 **Made in Italy**
Agricoltura intelligente *di Letizia Gabaglio*

16 **Scienza e filosofia**
Cosmologia e filosofia *di Elena Castellani*

17 **Appunti di laboratorio**
Un sonno trasversale *di Edoardo Boncinelli*

18 **Il matematico impertinente**
La drosofila assiomatizzata *di Piergiorgio Odifreddi*

19 **La finestra di Keplero**
Un pianeta davvero speciale *di Amedeo Balbi*

20 **Homo sapiens**
Sulle tracce dell'harem di Lucy *di Giorgio Manzi*

88 **Coordinate**
Chi inquina di più negli Stati Uniti *di Mark Fischetti*

89 **Povera scienza**
Il motore impossibile targato NASA *di Paolo Attivissimo*

90 **La ceretta di Occam**
Per avere occhi da cerbiatta *di Beatrice Mautino*

91 **Pentole & provette**
Danni da congelamento *di Dario Bressanini*

92 **Rudi matematici**
Le conseguenze della ginnastica
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

94 **Libri & tempo libero**

SCIENZA NEWS

21 Arginare la marea nera

22 Un lampo radio per studiare l'universo

22 Nuovo record per l'entanglement di fotoni

23 Data di nascita e suscettibilità all'influenza

23 Sigarette e mutazioni

24 Fusioni difficili da fermare

24 Emissioni stabili di anidride carbonica

25 Il Neanderthal che è in noi

25 Ricominciare a camminare con il wireless

26 Brevissime

Andrew McNaughton/Getty Images (*in alto*); cortesia NASA/Goddard/Arizona State University (*al centro*); malyugin/iStockphoto (*in basso*)

Y&R

Oggi puoi leggere Le Scienze e Mente&Cervello direttamente su PC.

Sfoglia le Scienze online.

I migliori approfondimenti su scienza, tecnologia e innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista comodamente a casa sul tuo PC. Inoltre su App Store è disponibile l'app de Le Scienze per iPad. Scopri le offerte su **http://s.lescienze.it/offerte**

Le Scienze

LEGGERE, APPROFONDIRE, COLLEZIONARE.

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

ABBONATI SUBITO

CON QUESTA PROPOSTA SUPERVANTAGGIOSA.

PIÙ AUMENTA LA DURATA, PIÙ RISPARMI!

DURATA	PREZZO INTERO	PREZZO PER TE
1 ANNO 12 numeri	~~€54,00~~	€39,00
2 ANNI 24 numeri	~~€108,00~~	€75,00
3 ANNI 36 numeri	~~€162,00~~	€99,00

Solo con l'abbonamento puoi consultare su www.lescienze.it il ricchissimo archivio dal 1968 ad oggi.

APPROFITTA DI QUESTA OFFERTA SPECIALE!

Spedisci la cartolina che trovi nella rivista oppure trasmettila via fax al n. 02.70.64.82.38

Se preferisci collegati al sito www.ilmioabbonamento.it o telefona al numero 199.78.72.78*

*0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,49 cent di euro al minuto + 6,29 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,8 cent di euro al minuto + 15,75 cent di euro di scatto all a risposta (iva inclusa).

di Marco Cattaneo

Inseguendo le stelle

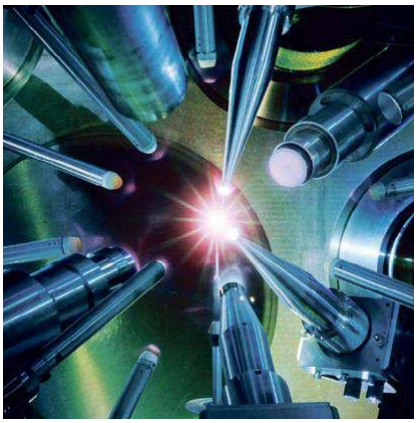
La fusione nucleare controllata è ancora una chimera

La scoperta della fusione nucleare risale alla fine degli anni venti del Novecento – quasi un decennio prima della scoperta della fissione – quando Robert Atkinson e Fritz Houtermans usarono le misure delle masse degli elementi più leggeri per ipotizzare che la fusione di nuclei leggeri avrebbe liberato enormi quantità di energia. Nel decennio successivo Hans Bethe avrebbe elaborato quantitativamente la teoria della fusione termonucleare, descrivendo i passi del ciclo principale che alimenta le stelle. Gli studi per sfruttarla a scopo militare ebbero inizio già con il Progetto Manhattan, e portarono alla prima bomba H – «la super», come la chiamava Edward Teller che ne fu il più fervente sostenitore – sperimentata dagli Stati Uniti nel novembre 1952. In quegli stessi anni furono avviati anche i primi studi sulla fusione termonucleare controllata, che costituirebbe una fonte di energia pulita e praticamente inesauribile.

Che non fosse un'impresa facile, lo si sapeva dall'inizio. Per sfruttare una fonte di energia così straordinaria occorre infatti generare un plasma e confinarlo a temperature dell'ordine dei 100 milioni di gradi. Almeno. Un reattore, insomma, deve comprimere il plasma surriscaldato in uno spazio relativamente piccolo dentro una camera a vuoto e mantenervi i nuclei finché avvengono le reazioni.

Ma forse non molti pensavano che fosse così difficile. Al punto che a distanza di oltre sessant'anni dai primi studi non è ancora stato realizzato un prototipo di reattore funzionante con continuità, e dunque siamo molto lontani dal sogno di reattori commerciali. Le speranze si erano riaccese nel 2006, con il lancio del progetto internazionale ITER, la cui costruzione è in corso a Cadarache, in Francia. Ma i progressi sono lentissimi, e i costi lievitano. Come racconta W. Wayt Gibbs a pagina 28, la costruzione avrebbe dovuto terminare nel 2016, a un costo di 11 miliardi di dollari. Che nel frattempo sono diventati 20. Ma, peggio, nella migliore delle ipotesi ITER «non sarà operativo prima del 2035». Difficoltà analoghe le attraversa la National Ignition Facility del Lawrence Livermore National Laboratory, una macchina da 4 miliardi di dollari sviluppata per la ricerca militare. Al momento, l'energia prodotta dalla NIF dovrebbe aumentare di 30.000 volte per compensare i laser usati per il confinamento dei minuscoli contenitori di combustibile.

Anche guardandoli con ingiustificato ottimismo, questi progetti mastodontici non arriveranno a immettere elettricità



Cortesia NIF

in rete almeno fino a metà del secolo. Eppure il sogno della fusione termonucleare controllata è così ambizioso da aver attratto l'interesse di grandi investitori privati, da Amazon a Microsoft fino a Goldman Sachs. E neonate società come General Fusion, Tri Alpha o HyperV Technologies stanno sviluppando progetti meno colossali, meno costosi e più pratici di quelli istituzionali.

Qualcuno nutre ancora molte speranze, qualcuno è scettico. Ma la posta in gioco è così alta che vale ancora la pena di investire nello sviluppo di una tecnologia che, a un secolo dalla scoperta dei principi fisici che governano il fenomeno della fusione, rimane ancora una chimera.

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

Vinton Cerf
Chief Internet Evangelist, Google

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Richard Dawkins
fondatore e presidente, Richard Dawkins Foundation

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Kaigham J. Gabriel
presidente e CEO, Charles Stark Draper Laboratory

Harold Garner
direttore, divisioni sistemi e informatica medici, docente, Virginia Bioinformatics Institute, Virginia Tech

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Danny Hillis
co-presidente, Applied Minds, LLC

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Vinod Khosla
Partner, Khosla Ventures

Christof Koch
docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Lawrence Lessig
docente, Harvard Law School

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore ordinario filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Eugenie C. Scott
Founding Executive Director, National Center for Science Education

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Shermer
editore, rivista «Skeptic»

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

Jonathan Zittrain
docente di legge e computer science, Harvard University

Uno sguardo al nostro passato

A febbraio *Esperimenti naturali di storia,* di Jared Diamond e James A. Robinson

Gli scienziati che volgono lo sguardo al passato nel tentativo di acquisire nuove conoscenze devono fare i conti con un limite: non possono contare sul cosiddetto esperimento di laboratorio controllato, in cui il ricercatore manipola in modo diretto le variabili. Questo tipo di esperimento è considerato un tratto distintivo del metodo scientifico, e di fatto è l'unico usato dalle scienze dure di laboratorio (fisica, chimica e così via) e da alcuni ambiti della scienza della vita, per esempio la biologia molecolare. È evidente però che l'esperimento controllato è di fatto inaccessibile per ambiti come biologia evoluzionistica e paleontologia, e in alcuni casi niente affatto rari di epidemiologia, geologia e astronomia, per esempio. Il motivo è semplice e lapidario: non possiamo manipolare il passato.

C'è tuttavia una soluzione, che va sotto il nome di esperimento naturale o metodo comparativo. In questo metodo, lo scienziato confronta, preferibilmente in modo quantitativo e con l'aiuto della statistica, sistemi che siano simili fra loro sotto molti aspetti ma che differiscano per fattori di cui vuole investigare un eventuale ruolo. È un approccio utile anche per lo studio delle società umane, come mostra *Esperimenti naturali di storia*, libro a cura di Jared Diamond e James A. Robinson, allegato a richiesta con «Le Scienze» di febbraio e in vendita per Codice Edizioni.

Diamond, docente di geografia all'Università della California a Los Angeles, noto al grande pubblico anche per *best seller* sulla storia della popolazioni umane, e Robinson, oggi docente alla Harris School of Public Policy Studies dell'Università di Chicago, illustrano l'applicazione del metodo comparativo allo studio della storia umana recente presentando otto studi in sette capitoli, ciascuno dei quali ha autori diversi. Per confrontare il metodo comparativo con slo tile narrativo tradizionale degli storici, i primi capitoli seguono proprio lo stile narrativo, mentre in quelli successivi gli autori passano a studi quantitativi con analisi statistiche. Dunque nel primo capitolo gli autori si domandano per quali motivi la colonizzazione da parte di un unico popolo ancestrale, gli antichi Polinesiani, abbia portato a evoluzioni storiche assai diverse in decine di isole del Pacifico. Oggetto di studio del secondo capitolo sono società di frontiera, con un confronto tra sette di queste società dell'Ottocento: quelle negli Stati Uniti, i cosiddetti British wests (Canada, Australia, Nuova Zelanda e Sudafrica), Argentina e Siberia. Anche in questo caso lo studio mira a identificare eventuali fattori comuni che abbiano influito sull'evolversi delle rispettive storie.

Il capitolo successivo confronta Stati Uniti, Messico e Brasile, e origini ottocentesche dei rispettivi sistemi bancari. E dimostra che le differenze tra questi sistemi ebbero conseguenze importanti per le storie delle tre nazioni. Altro argomento di studio sono i fattori che hanno portato a una differenza clamorosa Haiti e Repubblica Dominicana, che si dividono la medesima porzione di terra, l'isola di Hispaniola. Nel capitolo seguente Diamond si domanda perché l'isola di Pasqua è diventata l'isola più deforestata del Pacifico, «con pesanti conseguenze per la sua società umana dipendente dal legname». I capitoli conclusivi affrontano grandi perturbazioni, ovvero tratta degli schiavi africani, governo coloniale britannico in India e mutamenti istituzionali successivi alle conquiste della Rivoluzione francese, e le loro conseguenze storiche su vaste aree geografiche. Il tutto con un unico obiettivo, che la storia sia maestra di vita con basi sempre più solide.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 8,40 incluso il prezzo di spedizione e telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 chi chiama da telefoni non abilitati).

La stessa offerta è valida per richiedere i volumi della collana **I manga delle scienze** al prezzo di € 9,90 incluse le spese di spedizione.
Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa).

Galina Barskaya/Shutterstock

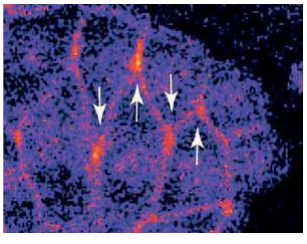
a cura di Giovanni Spataro

Che tempo fa su mondi lontani

Rilevati per la prima volta fenomeni meteo su un esopianeta gigante gassoso

Forti venti e nuvolosità variabile nell'arco della giornata. È il bollettino meteo dell'esopianeta HAT-P-7 b emerso dai dati del telescopio spaziale Kepler della NASA, che per quattro anni ha misurato le variazioni dell'intensità luminosa di HAT-P-7 b. Come riportato su «Nature Astronomy» da David Armstrong dell'Università di Warwick e colleghi, autori del bollettino, osservare cambiamenti irregolari nell'atmosfera di pianeti di altri sistemi stellari è ancora un obiettivo assai complicato da raggiungere (si veda *Il clima degli esopianeti* in «Le Scienze» n. 535, marzo 2013). Per la prima volta però è stata ottenuta una visione dell'evoluzione meteo per un gigante gassoso, come appunto HAT-P-7 b grande il 40 per cento in più del nostro Giove, la cui temperatura superficiale è di 1927 °C e orbita attorno alla stella madre in due giorni terrestri.

Il posto della cellula



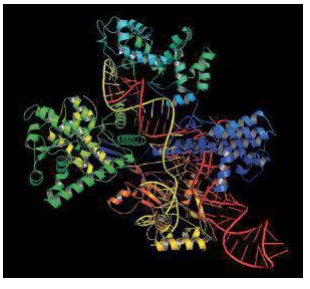
In movimento. Alcune delle cellule studiate mentre si posizionano al posto giusto grazie alla proteina CDC-42.

Lo sviluppo di un organismo è un processo in cui il concetto di ordine è fondamentale: ogni cellula deve conoscere la propria posizione rispetto al resto del corpo di cui fa parte, in caso contrario la malformazione o il meccanismo patogenico sono dietro l'angolo. Da decenni è ormai chiaro che un gruppo di proteine è fondamentale per permettere alle cellule di capire in quale direzione si trovino la parte frontale, il dorso o la testa, tra le altre cose, dell'animale (si veda *Una bussola per le cellule* in «Le Scienze» n. 573 maggio 2016). Ora, con uno studio pubblicato su «PLoS Genetics», Elise Walck-Shannon dell'Università del Wisconsin-Madison e colleghi, hanno identificato un'altra di queste proteine, indicata con la sigla CDC-42.

A essere precisi, da tempo era noto il ruolo di CDC-42 nel permettere alle cellule di distinguere il loro lato anteriore da quello posteriore e il sopra dal sotto. Walck-Shannon e colleghi hanno scoperto che questa proteina gioca un ruolo fondamentale nell'orchestrare lo sviluppo del tessuto connettivo embrionale, un processo solo in apparenza caotico. Il risultato è stato ottenuto per il verme *Chaenorhabditis elegans*, tuttavia, specificano gli autori, è valido anche per l'essere umano, dato che CDC-42 è altamente conservata nella storia evolutiva dal verme fino alla nostra specie, come del resto le altre proteine che fungono da bussola nelle cellule di un organismo.

Editing umano

La tecnica CRISPR-Cas9 che permette di editare genomi con una facilità e rapidità senza precedenti è stata testata per la prima volta su esseri umani (si veda *L'enzima che rivoluziona la genetica* in «Le Scienze» n. 572, aprile 2016). La notizia è stata data da «Nature» in un articolo del giornalista David Cyranoski, secondo cui scienziati diretti dall'oncologo Lu You della Sichuan University a Chengdu hanno iniziato a testare CRISPR-Cas9 come strategia nella lotta a tumori al polmone.



Guida e cesoie. CRISPR-Cas9 è composto da una guida a RNA che indirizza forbici proteiche verso il punto di taglio del DNA.

Nello specifico, You e colleghi avrebbero prelevato cellule immunitarie da un paziente con una forma di tumore al polmone e le avrebbero editate in modo da disattivare il gene che codifica per la proteina PD-1, che in condizioni normali frena la risposta delle cellule immunitarie verso le cellule tumorali. Una volta fatte proliferare in coltura, le cellule immunitarie modificate sono state reinfuse nel paziente. Per il gruppo cinese questo è solo un test sulla sicurezza della procedura, che nei prossimi mesi dovrebbe riguardare altre nove pazienti.

Tre quasicristalli

C'è un nuovo membro nella piccola famiglia dei quasicristalli naturali, cioè strutture la cui struttura è a metà strada tra quella ordinata dei cristalli veri e propri, per esempio i minerali, e quella disordinata osservata, per esempio, nei materiali vetrosi (si veda *Cristalli impossibili, o quasi* in «Le Scienze» n. 522, febbraio 2012). Il nuovo arrivato è stato identificato da Paul Steinhardt della Princeton University, pioniere nello studio di queste strutture e Luca Bindi dell'Università di Firenze in un frammento di meteorite caduto nella regione orientale russa Khatyrka.

Sempre dallo stesso frammento erano già stati identificati altri due quasicristalli, che differiscono tra loro e con il nuovo arrivato per struttura e composizione; l'ultimo arrivato inoltre è l'unico dei tre a non essere stato previsto per via teorica. I tre quasicristalli osservati nel meteorite sono gli unici esempi di queste strutture osservate in natura (si veda *L'impossibile caduto dal cielo* in «Le Scienze» n. 544, dicembre 2013), mentre sono ormai oltre un centinaio i quasicristalli sintetici, per la cui scoperta Daniel Shechtman nel 2011 ha ricevuto il premio Nobel per la chimica.

Cortesia NASA/ESA/G. Bacon, STScI (*illustrazione HAT-P-7b*); cortesia Elise Walck-Shannon e Jeff Hardin, Università del Wisconsin-Madison (*cellule*); ibreakstock/Shutterstock (*struttura CRISPR-Cas9*)

di Giovanni Spataro

Una tuta per tornare a camminare

L'ingegnere irlandese Conor Walsh ha sviluppato un dispositivo robotico soffice per sostenere la deambulazione in persone con disordini neurologici

Un aiuto robotico per far tornare a camminare soggetti con problemi motori. L'idea è di Conor Walsh, trentacinquenne irlandese che fa ricerca alla Harvard University, e non è affatto peregrina. Ha già attirato l'attenzione di importanti finanziatori pubblici ed è stata da poco premiata con il Rolex Awards for Enterprise 2016 (*si veda il box a p. 12*), riconoscimento pensato per persone con idee originali che vogliono cambiare il mondo.

In effetti l'approccio di Walsh è assai diverso da quello seguito finora in robotica. Scordatevi esoscheletri rigidi e pesanti, di quelli, per intenderci, proposti in film di fantascienza. La soluzione di Walsh passa per una sorta di tuta, cioè un insieme di cavi, sensori, attuatori, unità di elaborazione dati e fasciature morbide che un soggetto può indossare senza sentirsi costretto in una struttura ingombrante e fissa, senza interfacce che penetrino nel corpo. Grazie a questo sistema il soggetto può sperimentate una camminata assistita, l'ideale per persone con difficoltà deambulatorie, per esempio pazienti colpiti da ischemia cerebrale – 15 milioni ogni anno secondo la World Heart Federation – al centro dell'attenzione di Walsh e colleghi, tramite una collaborazione con l'Università di Boston. A proposito di colleghi, durante il giro ad Harvard, dove lo abbiamo incontrati di recente, il ricercatore irlandese ha sottolineato spesso il ruolo dei suoi circa 30 collaboratori nello sviluppo della tuta robotica: è un lavoro di gruppo, ha spiegato, in cui ognuno è importante.

Come le è venuta in mente l'idea?

Quando ero dottorando al Massachusetts Institute of Technology (MIT) lavoravo con esoscheletri rigidi e avevo capito che aumentare le capacità delle persone in salute con questo approccio era una grande sfida. Così, quando in seguito sono diventato *faculty member* ad Harvard, ispirato da lavori di miei colleghi che lavoravano con la robotica *soft*, ho pensato che sarebbe stato bello rendere indossabile quella robotica soffice, in modo che potesse dare alle persone un impulso di energia al tempo giusto, e quindi farle muoversi e camminare in modo più efficiente.

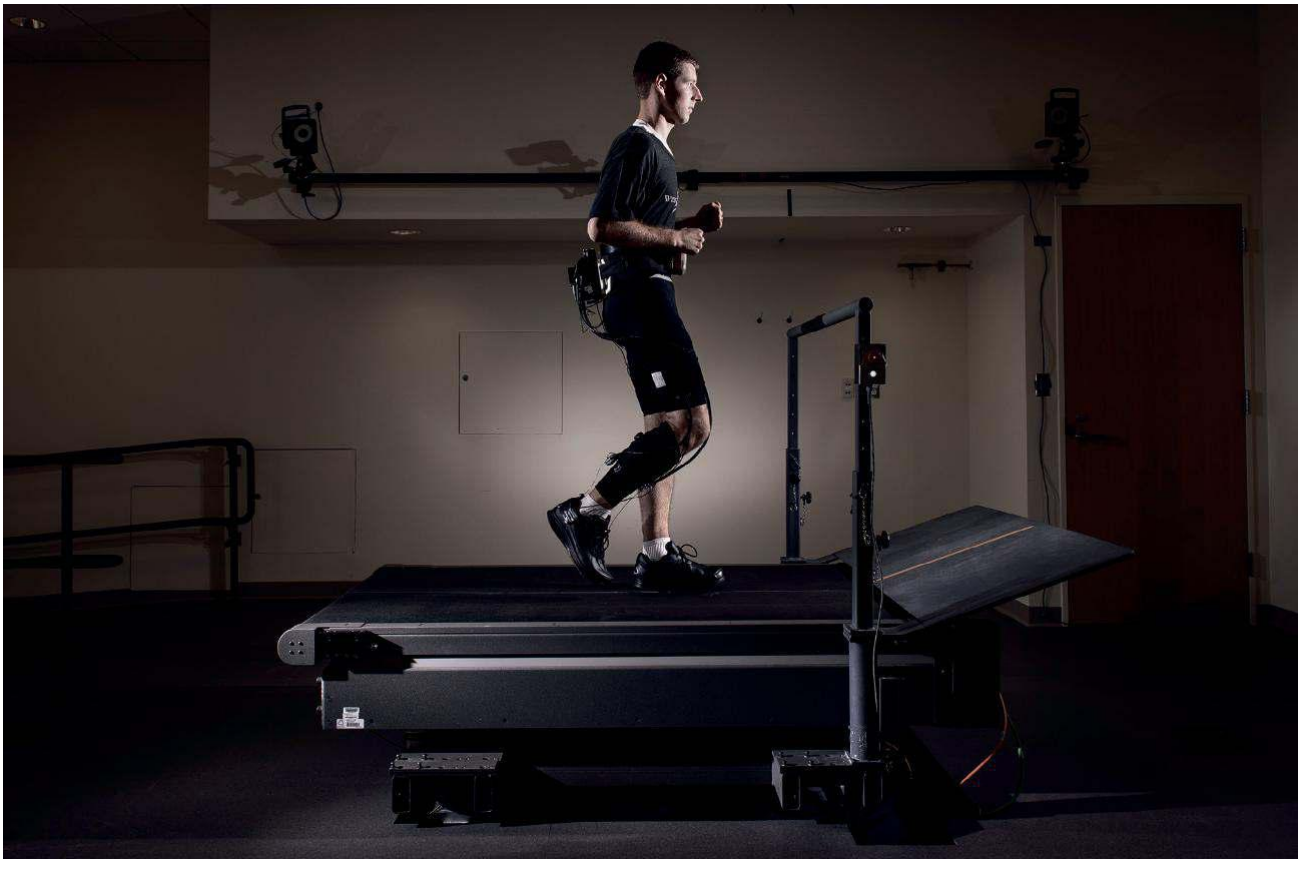
Gli aspetti chiave di questa tuta, la *exosuit*, sono emersi fin dall'inizio, quando c'era un programma della statunitense Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) mirato a proposte per la costruzione di un robot indossabile, grazie a cui aiutare le persone a camminare in modo più efficiente. Vista la mia esperienza al MIT con gli esoscheletri, mi sono detto: «Ehi, proviamoci! Possiamo possiamo fare qualcosa di interessante». L'idea è stata una combinazione tra il mio arrivo ad Harvard, e quindi essere ispirato dai colleghi, e la richiesta della DARPA.

È vero che stato ispirato anche da un articolo pubblicato su «Scientific American»?

La tuta e le prove. La exosuit di Walsh e collaboratori montata su un manichino; a fronte un test di laboratorio alla Harvard University.

CHI È

Conor Walsh è John L. Loeb Associate Professor di ingegneria meccanica e biomedica alla Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, e Core Faculty Member al Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering della Harvard University dove dirige l'Harvard Biodesign Lab, che ha fondato nel 2012.
Irlandese di nascita e istruzione, laurea in ingegneria meccanica e manifatturiera al Trinity College di Dublino, Walsh ha ottenuto un PhD in ingegneria meccanica al Massachusetts Institute of Technology prima di trasferirsi ad Harvard per fare ricerca in ingegneria ispirata alla biologia e tecnologie indossabili, che hanno fruttato finora oltre 30 riconoscimenti pubblici e professionali, oltre una decina di domande di brevetto e oltre 100 pubblicazioni scientifiche.



©Rolex/Fred Merz (*tutte le foto del servizio, 7*)

Sì, è vero. All'inizio di tutto questo percorso, quando mi ero appena laureato al Trinity College di Dublino, cercavo di capire che cosa avrei voluto fare dopo. Stavo leggendo un articolo su «Scientific American», in cui c'era un esoscheletro di un progetto della DARPA sulla robotica indossabile per soldati, ed è stato una vera ispirazione. Mi sono detto che avrei voluto lavorare con quella robotica lì, per me era diventata la cosa più bella. Così ho fatto domanda al MIT, dove stava per iniziare un programma che si sarebbe concentrato sugli esoscheletri. Sarebbe stata la mia prima volta con questi dispositivi.

Quando è iniziato il progetto?

Abbiamo cominciato nel 2012; per il primo prototipo sono stati necessari sei mesi, era un prototipo molto rozzo, per il secondo abbiamo impiegato nove mesi. Abbiamo un nuovo prototipo in media ogni anno.

La tuta robotica che state sviluppando può essere utile sia a pazienti con una storia di ictus sia a soggetti in salute?

La tecnologia è di fatto la stessa per entrambi, abbiamo motori, cavi sensori, componenti attaccati alle gambe che monitorano i movimenti di una persona e determinano il momento in cui dovrebbe esserci un'assistenza. Abbiamo iniziato su persone in salute perché è più facile effettuare test e sviluppare la tecnologia. Una volta provato che la tecnologia è sicura, abbiamo cercato di capire quali pazienti potessero trarne maggior beneficio e ci siamo rivolti a quelli con ictus perché è un problema enorme. Spesso sono persone con disabilità fisiche, non riescono a camminare bene. Ci siamo chiesti se fosse possibile dare a questi pazienti una spinta al momento giusto in modo da riportare i loro movimenti a un livello un po' più normale. Quindi la tecnologia è molto simile, deve solo essere adattata a ciascun individuo.

Quali sono gli ostacoli principali?

La parte più importante di questo progetto riguarda l'abbigliamento, le parti che vanno sul corpo e il tessuto. Dobbiamo pensare

40 ANNI DI PREMI

Rolex Awards for Enterprise

Nel 2016 i Rolex Awards for Enterprise hanno compiuto quarant'anni. Istituiti nel 1976 dallo scomparso André J. Heiniger, presidente di Rolex, i riconoscimenti sono assegnati ogni due anni e danno un aiuto finanziario (100.000 franchi svizzeri, circa 93.000 euro), a progetti innovativi in cinque ambiti di ricerca: scienza e salute, tecnologia applicata, esplorazioni e scoperte, ambiente, tutela del patrimonio culturale.

La selezione dei vincitori spetta a una giuria internazionale di esperti. Nell'edizione del 2016, oltre a Conor Walsh, sono stati premiati: Andrew Bastawrous, oculista britannico che sta rivoluzionando l'assistenza oculistica nell'Africa subsahariana con un sistema portatile che permette di effettuare esami oculistici con uno smartphone; la peruviana Kerstin Forsberg, per un progetto in Perù mirato a proteggere le mante giganti lavorando con comunità locali e pescatori, in modo che seguano la strada dell'ecoturismo come fonte di reddito alternativa; la biologa marina tedesco-cilena Vreni Häussermann per un progetto dedicato alla protezione ambientale dei fiordi della Patagonia cilena; l'ingegnere ladakhi Sonam Wangchuk, che aiuta gli agricoltori dell'arido altopiano himalayano del Ladakh ad affrontare le carenze d'acqua.

ai cavi, a come attaccarli alla persona in modo che non si muovano troppo e che non siano scomodi. Quindi l'idea di ancorarli e attaccarli al corpo è stato un punto centrale del nostro lavoro.

Durante la visita ai laboratori ha sottolineato l'importanza dello sviluppo della robotica in tempi recenti

Nell'ultimo decennio il settore della robotica ha accelerato parecchio. Motori, batterie, microprocessori, componenti elettronici, tutto questo sta migliorando. Ne abbiamo tratto beneficio in termini di miniaturizzazione e prestazioni, abbiamo potuto bilanciare questi avanzamenti e integrarli in un sistema molto leggero e portatile per una persona. Quando ho iniziato al MIT, più di dieci anni fa, guardavo alla robotica un po' come alla fantascienza, qualcosa da poter fare solo in laboratorio. Ora invece stiamo vedendo differenti aspetti dei robot che iniziano ad apparire nella società; vediamo automobili che si guidano da sole e molte aziende che hanno messo in commercio prodotti per la robotica indossabile. Se me lo avessero chiesto dieci anni fa, non avrei pensato che tutto questo sarebbe potuto accadere.

Ci sarà spazio per l'intelligenza artificiale nel vostro esoscheletro soffice?

Abbiamo sensori che monitorano come si sta muovendo una persona, e usiamo quelle informazioni per assistere la persona osservando tempo e livello della velocità di assistenza. Come prossimo passo possiamo pensare a un sistema che impari come cammina una persona. Per esempio, nel caso di un paziente con ictus, se il sistema inizia ad assistere il soggetto, potrebbe imparare che sta migliorando e potrebbe continuare a rilevare parametri e cambiare la tempistica dell'assistenza in modo da rendere i parametri specifici allo stile della camminata di quella persona. Credo sia un concetto interessante su cui lavorare.

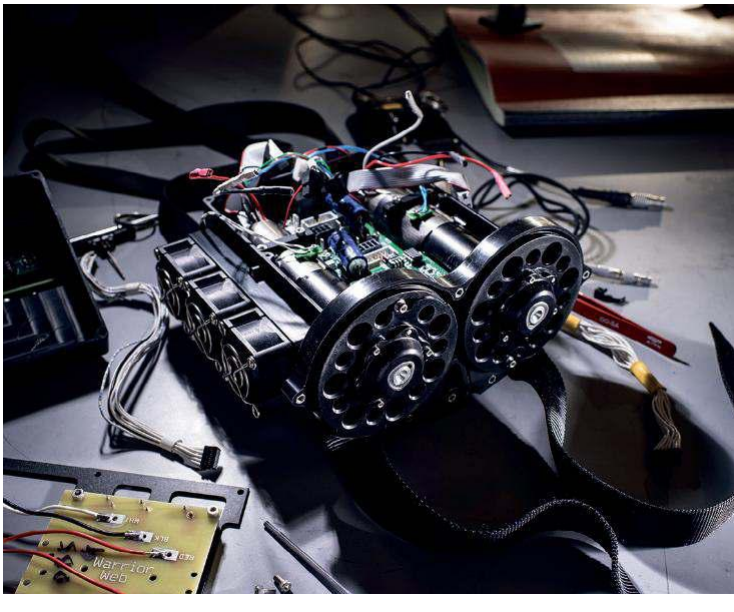
Quali risultati avete ottenuto?

Su soggetti in salute abbiamo registrato risultati entusiasmanti. Quando indossano la tuta possiamo farli camminare con uno sforzo minore del sette per cento. I pazienti con ictus possiamo farli camminare più simmetricamente, possiamo aiutarli a camminare più speditamente e con meno energia.

Quanto è distante l'applicazione clinica?

Per ora abbiamo effettuato numerosi trial con pazienti per aiutare i ricercatori a sviluppare la tecnologia. Ora che la tecnologia sta diventando più raffinata pensiamo che il prossimo grande pas-

Lavoro di gruppo. Analisi dei test della exosuit, il motore che alimenta la tuta robotica (*in basso*). A fronte: Walsh e un collega assemblano la tuta su un manichino (*sopra*); particolare di un test.



saggio sarà far diventare il nostro prototipo un prodotto grazie all'azienda con cui abbiamo una partnership, la ReWalk Robotics. Questo prodotto sarà testato in trial clinici.

La vostra tuta robotica potrebbe essere utile anche per pazienti con problemi diversi rispetto all'ictus?

Abbiamo tutto per adattare la tecnologia e farla funzionare a dovere con pazienti con morbo di Parkinson oppure sclerosi multipla, per esempio. È qualcosa che ci piacerebbe fare in futuro. Tuttavia abbiamo iniziato con l'ictus perché abbiamo ritenuto che fosse un problema di dimensioni notevoli.

Oltre alle gambe questa tecnologia potrebbe essere sviluppata per altre parti del corpo?

Sì, ci siano concentrati sulla caviglia e possiamo mirare all'articolazione dell'anca in alcuni pazienti. Ci sono casi in cui si può voler aiutare pazienti a sollevare le braccia od oggetti, effettuare attività quotidiane. È un'altra area che potrebbe essere interessante. Stiamo sviluppando diversi approcci per le braccia, da cui potrebbero trarre beneficio persone con lesioni spinali, aiutandole a sollevare gli arti superiori e ad afferrare oggetti.

Quale potrebbe essere l'utilità per persone in salute?

Per esempio per i soldati, che trasportano carichi pesanti, come 45 chilogrammi per una ventina di chilometri di camminata, la tuta potrebbe essere di aiuto, potrebbe farli stancare meno durante marce del genere e diminuire gli infortuni. Magari un giorno anche le persone che vorranno fare escursioni potranno indossare uno di questi sistemi ed essere attive per un tempo più lungo.

Qual è il budget per questo progetto e quanto costerà la tuta una volta sul mercato?

Non sono sicuro dell'esatto budget corrente, ma siamo nell'ordine di diversi milioni di dollari negli ultimi due anni, ricevuti da DARPA e National Science Foundation. Riguardo al costo una volta sul mercato, è la parte più difficile da dire per me. Non siamo concentrati sulla produzione. Tutto quello che posso dire è che gli esoscheletri già sul mercato costano tra 70.000 e 200.000 dollari, ma pensiamo che il nostro sistema avrà prezzi più accessibili. La versione medica dovrebbe essere pronta tra tre anni.

di Letizia Gabaglio

Agricoltura intelligente

Evja ha sviluppato un sistema di supporto decisionale che previene l'insorgere di patogeni e rende più efficienti potatura, irrigazione e gestione delle piantagioni

Di fronte alla forza della natura e alla variabilità del tempo atmosferico, per ottenere un buon raccolto gli antichi Romani pregavano la dea Opi, personificazione della Terra e dispensatrice dell'abbondanza. Nel 2016 gli agricoltori si possono affidare ancora a Opi per assicurarsi che le colture crescano al meglio, ma non si tratta certo di una divinità.

«OPI sta per Osserva-Prevedi-Intervieni, ed è un sistema di supporto decisionale per aziende agricole. Grazie a una rete di sensori e algoritmi previsionali, OPI permette di monitorare in tempo reale le colture e prevedere l'insorgere di parassiti», spiega Paolo Iasevoli, responsabile dell'area business e marketing di Evja, la *start-up* campana che produce il sistema. «Il risultato è un risparmio economico, un uso ridotto di fitofarmaci e un prodotto più bio». Non male per un'azienda che nasce e opera nella cosiddetta «terra dei fuochi».

Una rete per i campi

Evja è di Acerra, a pochi chilometri da Napoli, e da qui vengono anche i suoi fondatori, tre amici con interessi e competenze diversi che due anni fa hanno deciso di mettersi insieme per lavorare nella cosiddetta «*smart agricolture*». «L'obiettivo chiaro fin dall'inizio era lavorare nel mondo dell'Internet of Things costruendo una rete di sensori che facessero comunicare le cose», spiega ancora Iasevoli, di Pomigliano d'Arco e amico dei tre soci fondatori, ai quali si è aggiunto a inizio 2016, dopo essersi occupato per molti anni di *business development* in giro per l'Europa. «Era meno chiaro, invece, quale fosse il campo giusto per applicare l'idea. Così abbiamo studiato il mercato e abbiamo capito che, a partire dal nostro territorio, il settore più promettente era quello dell'agricoltura».

Inizia così la collaborazione con la facoltà di agraria dell'Università degli Studi di Napoli «Federico II» che permette a Evja di acquisire le competenze specifiche necessarie. Prima di questa avventura, nessuno di loro aveva messo piede su un campo coltivato: uno dei soci, ingegnere, progettava radar; un altro era manager in un'azienda informatica, e il terzo ha un *background* economico-giuridico. Con le scarpe sporche di fango, i soci capiscono quali sono i fattori chiave che gli agricoltori devono tenere sotto controllo per avere una coltura abbondante. E si mettono al lavoro.

Nasce così il sistema OPI. Dal punto di vista *hardware*, si tratta di una rete di sensori connessa in modalità *wireless* che funziona in modo autonomo. Il programma invece si avvale di algoritmi che elaborano in tempo reale le informazioni provenienti dai sensori. «L'installazione del prodotto sul campo è intuitiva e non invasiva. I sensori monitorano costantemente i dati relativi ai fattori critici delle colture come temperatura, umidità, luminosità e bagnatura delle foglie. Le informazioni sono inviate alla piattaforma *software*, dove sono processate attraverso modelli previsionali e il risultato è presentato in tempo reale sulla *dashboard* accessibile da Web e dispositivi mobile», va avanti Iasevoli. In questo modo tutti i soggetti coinvolti nella gestione della coltivazione possono accedere in tempo reale a tutte le informazioni necessarie, dovunque essi si trovino.

Lo studio del mercato e delle esigenze permette di identificare due categorie specifiche di aziende agricole: quelle della IV Gam-

LA SCHEDA

Evja

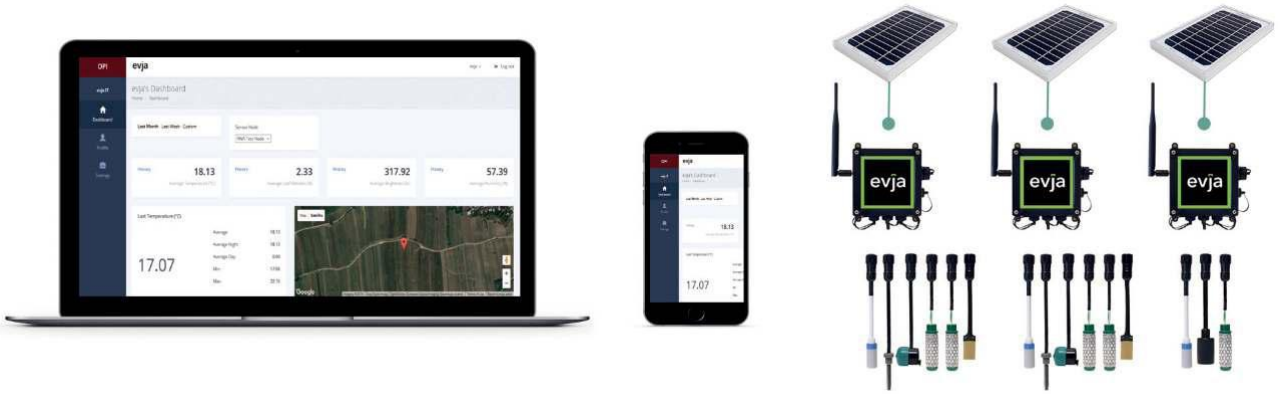
Fatturato
n.d.

Investimenti in ricerca
50.000 euro

Dipendenti/collaboratori
4 di cui 2 impiegati in R&S

Brevetti rilasciati
1 in fase di approvazione

Cortesia Evja (*tutte le immagini e illustrazioni, in questa pagina e nella pagina a fronte*)



Flusso di dati.
Qui sotto e in basso il sistema hardware di Evja installato nel vigneto della più grande azienda agricola austriaca; sopra, una schermata dei dati elaborati dal sistema su PC e su smartphone, e uno schema del sistema.

ma e quelle vitivinicole. «Nel primo caso si tratta di coltivazioni in serra di ortaggi da foglia, che l'azienda stessa provvede a imbustare e a vendere alla grande distribuzione. Le aziende operanti in questo settore adottano processi industriali e sono propense a sperimentare nuove tecnologie. Inoltre le colture di IV Gamma hanno cicli intensivi durante tutto l'anno. Nel secondo caso parliamo di uno dei settori più importanti nel mercato alimentare italiano in termini sia di fatturato sia di importanza strategica e di immagine», dice Iasevoli.

Potere all'agricoltore

Oggi le collaborazioni scientifiche si sono allargate ed Evja lavora fianco a fianco anche con l'ENEA e l'Istituto zooprofilattico sperimentale del mezzogiorno di Portici, vicino a Napoli. Queste collaborazioni hanno permesso ai giovani imprenditori - i soci sono tutti under 35 - di costruire un sistema efficiente ed efficace. Tanto che da quando Evja si è affacciata sul mercato le richieste sono piovute una dopo l'altra. Per ora i ragazzi di Napoli lavorano con alcune aziende che producono insalata da taglio nella zona di Salerno e hanno accettato la sfida lanciata dalla più grande azienda agricola austriaca di occuparsi anche di vigne. Ma il sistema OPI, con opportuni aggiustamenti, si può applicare a qualsiasi coltura, dalle patate ai pomodori, dalle mele alle pesche.

«I sensori sono collocati nei punti strategici in base alla morfologia del terreno in modo da monitorare zone uniformi e si programmano per rilevare i parametri richiesti. La comunicazione con il sistema in remoto può avvenire tramite rete *wi-fi* e mobile, ma anche attraverso le onde radio, grazie ad antenne a basso consumo che coprono 30 chilometri di raggio. In questo modo, anche nelle zone dove il wireless non arriva OPI funziona senza problemi», va avanti Iasevoli. I dati sono quindi spediti al sistema che li elabora e li restituisce all'agricoltore.

Sul computer, o anche su cellulare e *tablet*, però, non appaiono i risultati grezzi della rilevazione in campo bensì una elaborazione di alto livello che si ottiene incrociando i dati secondo algoritmi messi a punto da Evja. «In questo modo quando uno o più parametri scendono sotto la soglia considerata di sicurezza si genera un messaggio di allerta. L'ultimo a decidere rimane comunque sempre l'agricoltore: il nostro è un sistema di supporto decisionale non un sistema autonomo. La differenza è che prima l'agricoltore poteva affidarsi solo alla sua conoscenza delle variazioni stagionali per prevedere quanta acqua, concime o fitofarmaci dare alle proprie colture, ora segue passo dopo passo e con precisione scientifica quello che succede», conclude Iasevoli. Gli antichi si affidavano alle divinità, oggi preferiamo la tecnologia.

di Elena Castellani
professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Cosmologia e filosofia

Che cosa ha di particolare la cosmologia che la distingue da tutte le altre scienze?

"La filosofia sottostà ai nostri approcci alla cosmologia». Così si apre il contributo del noto astrofisico e cosmologo George Ellis al numero speciale della rivista «Studies in History and Philosophy of Modern Physics» dedicato agli aspetti filosofici della moderna cosmologia e uscito nel 2013. Un contributo il cui proposito dichiarato è proprio di mostrare come «la cosmologia trarrà benefici dal rendere esplicite le questioni filosofiche sottostanti». Delle questioni filosofiche che possono sorgere in relazione alla cosmologia, tanto da motivare alla riflessione anche scienziati che lavorano nel campo, si è già trattato in parte nella rubrica di maggio 2015. Qui ci soffermiamo in particolare sulla questione della loro specificità.

Anzitutto è bene precisare che la cosmologia a cui si riferiscono questo tipo di considerazioni è quella «scientifica». Si tratta cioè della disciplina che si occupa della struttura ed evoluzione dell'universo fisico nel suo complesso, la cui nascita come «scienza» viene comunemente fatta risalire ai primi modelli fisici dell'universo resi possibili dalla teoria della relatività generale, a partire da quello elaborato dallo stesso Einstein nel 1917. È una disciplina i cui sviluppi sono strettamente intrecciati non solo con quelli dell'astronomia e dell'astrofisica, com'è naturale, ma anche – specialmente per quanto riguarda gli ultimi decenni – con quelli teorici e sperimentali della fisica fondamentale, dalla fisica delle particelle elementari alle ricerche sulla gravità quantistica.

La specificità dell'indagine cosmologica ha dato origine a un settore specifico della filosofia della scienza.

Da una parte, quindi, le questioni che possono essere trattate dal punto di vista della riflessione filosofica sui fondamenti e la metodologia delle teorie cosmologiche sono del tutto simili a quelle relative alle teorie e metodologie di altri settori della fisica, e in particolare a quelli della fisica fondamentale. Ma nel caso della cosmologia acquistano una connotazione del tutto particolare, e questo è dovuto al fatto che la disciplina presenta specificità molto significative.

La ragione prima di queste specificità risiede nella natura dell'oggetto d'indagine. L'universo, se inteso come tutto quello che esiste in senso fisico, è per definizione unico: non c'è nulla all'infuori di esso ed è dato una sola volta. A differenza di quanto succede nelle altre discipline a carattere empirico, non è possibile compiere esperimenti sull'intero universo (come se ne potessimo uscire fuori), per controllare o confermare – secondo la metodologia scientifica usuale – le diverse teorie o modelli cosmologici. Non ci sono oggetti simili con cui confrontarlo (in modo da applicare, per esempio, considerazioni statistiche all'insieme degli universi esistenti) ed è problematico distinguere tra legge e condizioni iniziali. Non è possibile, inoltre, far ripercorrere all'universo le tappe della sua evoluzione in modo analogo a quando si ripete un esperimento. In questo senso si dice che la cosmologia è una scienza storica per eccellenza, con la peculiarità che si tratta di una storia del tutto unica, non paragonabile a nessun'altra.

La conoscenza dell'oggetto d'indagine è quindi inevitabilmente parziale, sia nello spazio sia nel tempo, e basata su estrapolazioni – che devono essere giustificate – da teorie locali a teorie sull'universo come un tutto (includendo anche la concezione, per ora puramente speculativa, che ipotizza più universi: parlare di multiverso non risolve infatti la maggior parte dei problemi accennati, comportandone solo il rimando al multiverso come un tutto). Un fatto a cui si aggiungono anche i limiti fisici posti alle osservazioni possibili: si possono ottenere informazioni solo da radiazioni arrivate fino a noi, da onde gravitazionali (ora una concreta possibilità di osservazione) e dai neutrini cosiddetti fossili, e ci sono diversi vincoli fisici, anche dipendenti dalle scelte di modelli teorici e di selezioni di dati compiute, che limitano le aree a noi accessibili.

Non sorprende, in definitiva, che la cosmologia abbia dato origine anche a un settore specifico della filosofia della fisica, la filosofia della cosmologia. Né che a quest'ambito di riflessione partecipino con interesse anche alcuni dei protagonisti della ricerca cosmologica: un ambito in cui si discutono – oltre alle particolarità e legittimità dei modelli cosmologici e delle metodologie applicate – anche questioni come quelle relative alla natura dello spazio-tempo (se per esempio sia fondamentale o emergente) o lo statuto dei principi usati per restringere la scelta tra i modelli cosmologici possibili (come il controverso «principio antropico»).

Cortesia NASA/JPL-Caltech

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Un sonno trasversale

Tratti fondamentali del ritmo sonno-veglia sono costanti in tutto il regno animale

Di recente è stato studiato il sonno e la regolazione del ritmo sonno-veglia in un rettile australiano. Si è visto che tutto questo somiglia al nostro sistema di regolazione sonno-veglia e che anche in questi draghetti ci sono fasi di sonno REM e fasi NonREM. Il sonno chiamato REM, o sogno paradosso, riguarda quattro o cinque fasi della nostra nottata in cui, pur dormendo, muoviamo in circolo i bulbi oculari (REM sta per *rapid eye movement*). Se veniamo svegliati durante una di queste fasi, raccontiamo spesso di stare sognando. Le fasi di sonno REM sono molto frequenti nell'infante e nel bambino, mentre si rarefanno con l'avanzare dell'età. Se si impedisce a un volontario di avere abbastanza sonno REM, svegliandolo appena inizia una di queste fasi, di giorno si mostra molto più stanco e appena può, dorme saporitamente, recuperando molto sonno REM. Il sonno NonREM indica invece collettivamente tutte le altre forme di sonno.

Il fatto che i tratti fondamentali del fenomeno sonno siano così costanti nel regno animale mostra che si tratta di un meccanismo molto importante e fa sperare di riuscire a comprendere sempre meglio tutti i meccanismi, i circuiti nervosi e perfino i singoli neuroni - sempre più numerosi e sempre più sorprendenti - implicati nel controllo del fenomeno stesso. Molte cose si sono imparate di recente, ma il quadro è tutt'altro che completo. Un recente articolo di rassegna di Franz Weber e Yang Dan, entrambi dell'Università della California a Berkeley, pubblicato su «Nature» (Vol. 538, pp. 51-59) fa il punto su alcuni di questi processi.

Una cosa si sa ormai con certezza. La modulazione circadiana, della misura approssimata di 24 ore (*circa diem*) cioè, del ritmo sonno veglia dipende quasi totalmente dal nucleo soprachiasmatico (SCN) ipotalamico, il *pacemaker* principale dell'intero organismo. Una sua lesione o una lesione delle regioni che si trovano sotto il suo diretto controllo, alterano il ritmo diurno sonno-veglia, senza alterare la quantità del sonno stesso, dimostrando che il nucleo SCN è parte della regolazione temporale del sonno ma non della generazione del sonno stesso.

I neuroni del nucleo SCN sono molto attivi durante il giorno soggettivo dell'organismo e poco attivi durante la notte, indipendentemente dal fatto che si tratti di un organismo con abitudini diurne o notturne. Questa alternanza è a sua volta sotto il controllo diretto dello stato di luce o di buio del mondo circostante. Dopo un volo intercontinentale, sono queste condizioni che fanno riaggiustare il nostro ritmo sonno-veglia, anche se dopo qualche tempo. Il nucleo SCN contiene molti tipi di neuroni diversi e controlla direttamente molte altre sedi ipotalamiche, come il nucleo ipotalamico dorsomediale (DMH), fino ad arrivare al *locus coeruleus* (LC) localizzato nel tronco cerebrale, un centro vitale per la generazione e la caratterizzazione del sonno, attraverso il mantenimento dello stato di veglia diurno, e di molte altre cose. Il nucleo DMH sembra giocare un ruolo fondamentale perché una sua alterazione influenza la regolazione del ritmo sonno-veglia.

Si è visto di recente che questo nucleo contiene sia neuroni che stimolano sia neuroni che inibiscono lo stato di veglia. Quello che si vuole capire è la natura della generazione del sonno REM e che cosa controlla l'alternarsi di sonno REM e NonREM, una questione importante per il benessere dell'intero organismo, anche umano. Tuttavia, nonostante questi avanzamenti, ottenuti spesso con tecniche nuove, ci sono ancora molte cose che ci sfuggono del processo. Tra le tecniche nuove e spettacolari vale la pena di segnalare l'optogenetica, che permette di sopprimere selettivamente singoli neuroni con fasci laser di grande precisione. Si tratta in sostanza di una sorta di anatomia di precisione esercitata non in base ad aspetto o posizione dei singoli neuroni, ma sulla base della loro funzione. Si potrebbe parlare allora di microchirurgia funzionale, basata su raggi luminosi e informata dalla genetica.

Il pisolino dell'iguana. Uno studio su rettili ha mostrato che il sistema di regolazione sonno-veglia in questi animali somiglia a quello degli esseri umani.

Andrew McNaughton/Getty Images

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

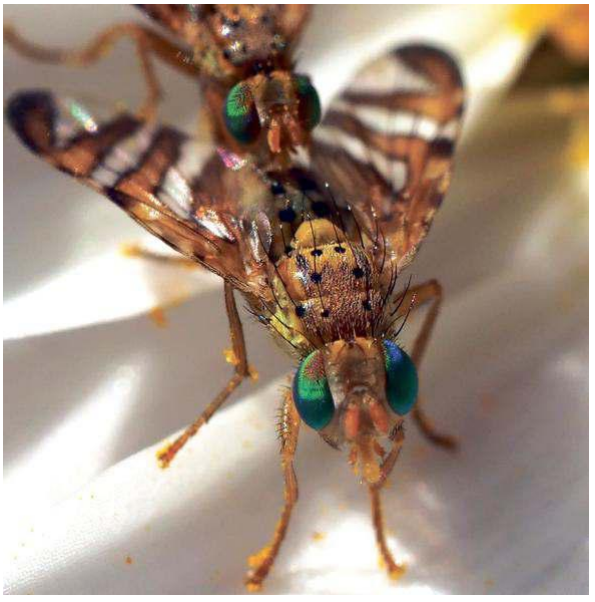
La drosofila assiomatizzata

L'approccio assiomatico può essere applicato anche a concetti non matematici

David Hilbert è stato il più grande matematico a cavallo tra Ottocento e Novecento, insieme a Henri Poincaré, e uno dei più grandi filosofi della matematica di inizio Novecento, insieme a Bertrand Russell e Luitzen Brouwer. Mentre questi proponevano entrambi una riduzione della matematica, il primo alla sola logica e il secondo ai soli aspetti costruttivi, Hilbert ampliò in due direzioni l'approccio assiomatico già adottato da Euclide: studiando, da un lato, le proprietà metamatematiche degli assiomi, come indipendenza, consistenza e completezza, e, dall'altro lato, le proprietà strutturali delle dimostrazioni, come lunghezza ordinale e complessità logica.

Tra i vantaggi dell'approccio assiomatico che Hilbert sottolineava c'era la possibilità di molteplici interpretazioni, dunque di molteplici applicazioni, dei vari sistemi. Emblematica di questa concezione è diventata una sua osservazione a proposito del fatto che se alcuni concetti soddisfano tutti gli assiomi dei punti, delle linee e dei piani, allora devono anche soddisfare tutti i teoremi della geometria: fossero pure concetti apparentemente non matematici come *Tavoli, sedie, boccali di birra*, il titolo del recente bel libro di Gabriele Lolli (Raffaello Cortina, 2016) che analizza in dettaglio il lavoro fondazionale di Hilbert.

Che dicesse sul serio è dimostrato da un suo articolo del 1930, *Conoscenza della natura e logica*, in cui si legge: «La drosofila è una piccola mosca di grande interesse. Normalmente questo moscerino è grigio, ha gli occhi rossi, è senza macchie e ha le ali rotonde e lunghe. Ma ci sono anche moscerini in cui queste cinque caratteristiche sono differenti, e le deviazioni dai normali accoppiamenti fra le varie caratteristiche si registrano nella discendenza in una ben definita percentuale costante. Per i numeri così trovati sperimentalmente valgono gli assiomi euclidei della congruenza e gli assiomi dello "stare fra": quindi, le leggi dell'ereditarietà si ricavano come applicazione degli assiomi della congruenza lineare, cioè dei teoremi geometrici elementari sul trasporto dei segmenti, con tanta semplicità e precisione, e al tempo stesso in maniera tanto meravigliosa, quale nemmeno la più audace fantasia avrebbe immaginato».



Un esercizio geometrico sui geni della drosofila contribuì a far vincere il Nobel per la medicina a Thomas Morgan.

Hilbert non offre dettagli, ma una lettura della saga della ricerca sulla drosofila raccontata da Martin Brookes in *Dio creò la mosca* (Longanesi, 2003) permette di ricostruire cosa intendesse.

La storia inizia nel 1910, quando Thomas Morgan fece la prima grande scoperta sulla drosofila: un moscerino con gli occhi bianchi anziché rossi. L'incrocio della «mosca bianca» con una femmina dagli occhi rossi produsse una prima generazione di figli e figlie tutta con gli occhi rossi, mentre nella seconda generazione gli occhi bianchi ricomparvero, in proporzione di circa 1 su 4: tutte le nipoti avevano gli occhi rossi, mentre metà dei nipoti avevano gli occhi rossi, e metà bianchi. La spiegazione di Morgan fu che il gene del colore degli occhi doveva stare sul cromosoma X, e quello del colore rosso doveva essere dominante. In questo modo nella prima generazione sia i maschi (XY) sia le femmine (XX) hanno una copia del gene dominante della madre, e dunque gli occhi rossi. Nella seconda generazione le femmine continuano ad avere gli occhi rossi perché ricevono dal padre il gene rosso, ma i maschi hanno il colore determinato dai gene della madre, che ne ha uno rosso e uno bianco: dunque, metà dei maschi hanno gli occhi rossi e metà bianchi. Morgan osservò poi che la mutazione di un altro gene sul cromosoma X provocava cambiamenti nelle ali, ma in maniera indipendente dalle mutazioni del gene degli occhi. Questo significava che un processo di ricombinazione dei cromosomi appaiati effettua un «copia e incolla» dei geni, e la frequenza con cui le mutazioni compaiono accoppiate negli individui è una misura di quanto i relativi geni siano vicini o lontani sul cromosoma.

I geni sui cromosomi sono dunque ordinati linearmente, e si trattava di individuare la mappa della disposizione dei cinque geni fino ad allora scoperti sul cromosoma X, a cui alludeva appunto Hilbert, in base alla frequenza degli accoppiamenti delle mutazioni. Cosa che fu fatta nel 1911, in una sola notte, dal diciannovenne studente Alfred Sturtevant, appunto come un banale esercizio geometrico di applicazione (ai geni sui cromosomi) delle proprietà della relazione «stare fra» (dei punti sui segmenti), ma contribuì a far vincere a Morgan il Nobel per la medicina nel 1933.

Luise Thiemann/Eyeem/Getty Images

di Amedeo Balbi
Astrofisico, ricercatore al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Un pianeta davvero speciale

La colonizzazione di altri corpi celesti non permetterà mai di sostituire la Terra

Una delle cose più importanti che si capiscono studiando l'universo è quanto sia speciale il pianeta dove ci è capitato di nascere. Non speciale nel senso di privilegiato o superiore, ma nel senso di prezioso. Prezioso per noi e per tutte le altre forme di vita che si sono adattate a viverci, attraverso un lungo e accidentato percorso di selezione naturale. La sensazione immediata, viscerale, della bellezza e della fragilità della Terra è comune a tutte le donne e gli uomini che hanno avuto la fortuna di osservarla dallo spazio: ha anche un nome, «*overview effect*», termine coniato dallo scrittore Frank White nel 1987 dopo aver intervistato 29 astronauti.

Anche senza salire su una nave spaziale, sappiamo ormai abbastanza sui meccanismi che rendono un pianeta adatto alla vita da essere consapevoli della particolarità della Terra. Il caso ha fatto sì che una quantità incredibile di ingredienti si amalgamassero nella miscela «giusta» per rendere il nostro pianeta abitabile e relativamente stabile per gran parte della sua storia geologica.

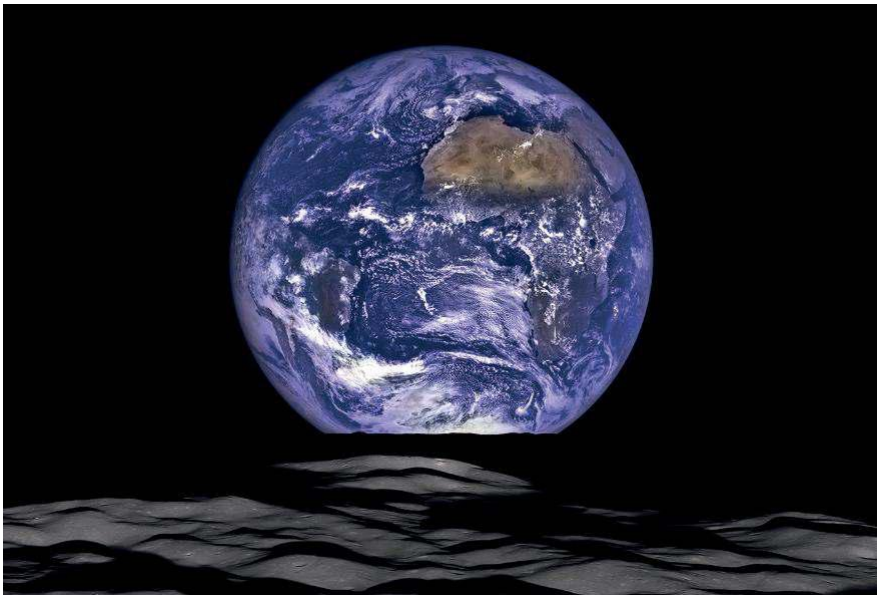
Non era affatto scontato che fosse così, basta guardare ai nostri due vicini – Venere bruciante e soffocato dai gas serra, Marte gelido e spoglio – per rendersi conto di come sarebbero potute andare le cose se le condizioni iniziali fossero state diverse. Lo studio dei pianeti extrasolari sta ulteriormente rafforzando la comprensione della complessa dipendenza tra le variabili che regolano le condizioni ambientali di un pianeta. E anche del ruolo che può avere la nostra stessa azione sull'equilibrio della Terra.

Non è vero, come talvolta si dice, che siamo la sola specie in grado di alterare l'ambiente terrestre su scala globale. I cianobatteri che poco più di due miliardi di anni fa iniziarono a pompare ossigeno nell'atmosfera, sterminando la maggior parte degli organismi anaerobi precedenti e preparando l'arrivo delle forme multicellulari, sono un esempio di come la vita possa plasmare radicalmente le condizioni di un intero pianeta. Ma noi esseri umani siamo certamente gli unici in grado di farlo consapevolmente, e su scale di tempo rapidissime.

Ormai non ci sono più dubbi sul fatto che l'attività umana sia la principale responsabile del rapido riscaldamento del pianeta. Lo scenario non è confortante. Il 2016 è stato l'anno più caldo da quando esistono misure dirette, e le temperature medie globali sono ormai pericolosamente vicine alla soglia di 1,5° C sopra quelle dell'epoca pre-industriale. Negli ultimi mesi i ricercatori hanno assistito sempre più preoccupati a quello avviene nella regione artica, in pieno inverno: il ghiaccio non si riforma ai ritmi consueti, e le temperature attorno al Polo Nord sono fino a 20° C superiori alla media stagionale.

Tutto questo accade mentre il cambio alla guida degli Stati Uniti, e l'insediamento di un'amministrazione certo non particolarmente sensibile al tema dei mutamenti climatici provocati dall'uomo, rischiano di sottrarre risorse preziose allo studio della Terra, magari indorando la pillola con la vaga promessa di concentrarsi sull'esplorazione del cosmo e del sistema solare, o sulla colonizzazione di altri pianeti. Ma per quanto entusiasmante sia l'idea di spingerci fuori dalla nostra culla, o di trovare prima o poi altri mondi adatti alla vita intorno ad altre stelle, sappiamo già che nulla potrà mai sostituire completamente la Terra. Il nostro pianeta è, verosimilmente, l'unica casa possibile per noi e per la vita che conosciamo.

Immaginare un futuro multi-planetario per la nostra specie è un'idea potente, che va certo perseguita: ma non deve farci perdere di vista la realtà. Amare l'universo, esplorarlo e capirlo, significa anche rendersi conto della precarietà del nostro piccolo mondo, e di come il nostro destino dipenda dal suo benessere.



Il sorgere della Terra visto dalla Luna. Il nostro pianeta è divenuto – e rimasto – abitabile grazie all'amalgama casuale di una quantità incredibile di ingredienti nella «giusta» miscela.

Cortesia NASA/Goddard/Arizona State University

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Sulle tracce dell'harem di Lucy

Scoperte a Laetoli nuove impronte di ominidi datate a più di 3,6 milioni di anni fa

Chiunque si interessi di evoluzione umana, conosce bene il nome di Laetoli e può collocare la località a occidente del sistema vulcanico di Ngorongoro, a metà strada fra il Lago Eyasi a sud e la colossale incisione della Gola di Olduvai più a nord, preludio a sua volta delle grandi distese pianeggianti del Serengeti. Lì a Laetoli, negli anni settanta, un gruppo di ricercatori guidati dall'ormai leggendaria Mary Leakey rinvenne reperti fossili di circa 3 milioni e mezzo di anni, cioè parecchio più antichi di quelli che stavano emergendo dalle scarpate di Olduvai.

Fra i fossili rinvenuti a Laetoli, c'era la piccola mandibola che sarebbe stata eretta a reperto di riferimento della specie di *Australopithecus* cui appartiene il più noto scheletro di Lucy, rinvenuto in quegli stessi anni, ma più a nord, in Etiopia. Poi, nel 1978, Mary Leakey e i suoi riportarono alla luce la pista di impronte per la quale il sito di Laetoli è maggiormente conosciuto. Si tratta delle tracce che tre individui bipedi lasciarono sulle ceneri eruttate da un vicino cratere vulcanico e rese umide e compatte dalla pioggia.

I tre sono di taglia diversa. Dalle impronte si deduce che uno era più grande, e camminava fianco a fianco, forse a stretto contatto fisico con un individuo più piccolo, mentre un terzo individuo, anch'esso relativamente piccolo, metteva i piedi nelle impronte lasciate dal primo.

È stato come se un riflettore si fosse acceso su una scena preistorica, tanto che ricercatori, divulgatori e illustratori scientifici si sono sbizzarriti nell'interpretarla. Chi non ha visto una di quelle ricostruzioni le può cercare on line: ne troverà diverse e quasi tutte mostrano un maschio bipede e peloso, con la faccia vagamente da scimpanzé, accompagnato da una femmina, simile a lui ma un po' più piccola; magari i due si tengono a braccetto e sono seguiti dall'altro, forse un cucciolo; talvolta la femmina è rappresentata incinta. Insomma, una coppia con la prole. Tutto molto umano, malgrado le apparenze da «pianeta delle scimmie».

Ma i nostri dati dicono che le cose non stanno così. Con lo staff della Scuola di paleoantropologia (operativa dal 2011 presso l'Università di Perugia, in collaborazione con altri atenei fra cui la Sapienza di Roma) ci troviamo su quel territorio del nord della Tanzania da alcuni anni. Siamo così stati coinvolti nella scoperta di nuove tracce bipedi che vennero impresse sullo stesso strato di cenere umida, a poco più di cento metri da quelle messe in luce alla fine degli anni settanta.

Sono emerse da tre sondaggi, ma è facile prevedere che si sviluppino in sequenza almeno per una trentina di metri, combinate con le impronte di molti altri animali. Le nuove tracce descrivono la presenza di almeno altri due individui bipedi, che camminavano nello stesso momento e nella stessa direzione degli altri tre già noti. Nel settembre 2015, abbiamo rilevato le nuove impronte con tecniche di fotogrammetria (e anche le vecchie, disponibili in calco). Abbiamo poi speso gran parte del 2016 a lavorare sui dati e a preparare la pubblicazione che ora è apparsa sulle pagine della rivista «eLIFE».

Quattro delle nuove tracce bipedi trovate nel sito di Laetoli. A lasciarle fu un individuo di grandi dimensioni probabilmente appartenente alla stessa specie di Lucy (*Australopithecus afarensis*).

Cortesia Raffaello Pellizzion

Il risultato più eclatante è che uno dei due «nuovi» individui è di taglia corporea davvero notevole, facendo presupporre che questo solo sia il maschio e gli altri quattro siano femmine e/o cuccioli. Ciò depone pertanto a favore di un elevato dimorfismo sessuale della specie (*Australopithecus afarensis,* con ogni probabilità) e di una struttura sociale poliginica o ad «*harem*», come si dice, più simile a quella dei gorilla che non alle comunità promiscue degli scimpanzé o a quelle familiari allargate di noi umani. Altro che coppietta romantica!

AMBIENTE

Arginare la marea nera

Il destino delle perdite di petrolio è legato a complesse interazioni biologiche

U.S. Coast Guard/Getty Images

Centosei giorni. Lo sversamento di petrolio causato dall'incidente della piattaforma Deepwater Horizon di BP è durato dal 20 aprile al 4 agosto 2010, quando i tentativi di fermare la gigantesca perdita hanno avuto finalmente successo. Nella foto, scattata il 21 aprile 2010, navi di soccorso alle prese con l'incendio della piattaforma.

Dopo una fuga di petrolio in mare, i microrganismi e i composti che secernono sono essenziali nel determinare l'entità dell'inquinamento. Ma l'applicazione dei disperdenti (composti che favoriscono la riduzione in gocce e la dispersione del petrolio galleggiante) potrebbe compromettere l'azione dei microrganismi risultando quindi controproducente. Molto tuttavia resta da indagare, perché le interazioni fra petrolio, disperdenti e microrganismi vari sono complesse, e ancora poco esplorate. Lo spiegano su «Limnology & Oceanography Letters» Antonietta Quigg, biologa marina alla Texas A&M University di Galveston, e il suo gruppo ADDOMEx, che partecipa alla grande iniziativa di ricerca sul destino del petrolio immesso nell'ambiente nel 2010 nel Golfo del Messico con l'incidente della piattaforma Deepwater Horizon.

La chiave sta nelle cosiddette sostanze polimeriche extracellulari: una gamma di polimeri diversi per natura (soprattutto polisaccaridi e glicoproteine, ma anche DNA, lipidi e altre molecole) e per proprietà fisico-chimiche, liberati nell'ambiente da batteri, archea e fitoplancton con varie funzioni biologiche. «Queste sostanze agiscono da disperdenti naturali. Legandosi al petrolio e ad altri detriti, ne favoriscono emulsificazione, dispersione e degrado, ma anche l'aggregazione in neve marina: quei flocculi che, precipitando sul fondo, sono uno strumento essenziale di autopulizia del mare», spiega Quigg.

Struttura e funzioni della comunità microbica sono a loro volta influenzate dal petrolio e dai disperdenti. La secrezione delle sostanze polimeriche, per esempio, aumenta in risposta a stress come l'inquinamento petrolifero, come si è visto con la massiccia produzione di neve marina dopo l'incidente del Golfo. Anche i disperdenti influiscono su produzione dei polimeri e aggregazione dei flocculi, e ci sono indizi di possibili effetti controproducenti.

«Molto sembra dipendere dai gruppi di organismi che consideriamo: gli effetti con ogni probabilità varieranno con la comunità microbica presente in un dato ambiente», osserva Quigg. «Le ricerche su queste interazioni non sono molte e sono state fatte per lo più solo in laboratorio. Dovremo studiare molto più a fondo che destini segue il petrolio anche in virtù di questi processi biologici: bisognerà definire meglio i polimeri extracellulari in gioco, capire come i microbi li producono in diverse condizioni ambientali, le interazioni tra i vari attori biologici e i fattori fisici e chimici. Solo così potremo rispondere con cognizione di causa alle prossime perdite».

Giovanni Sabato

ASTROFISICA

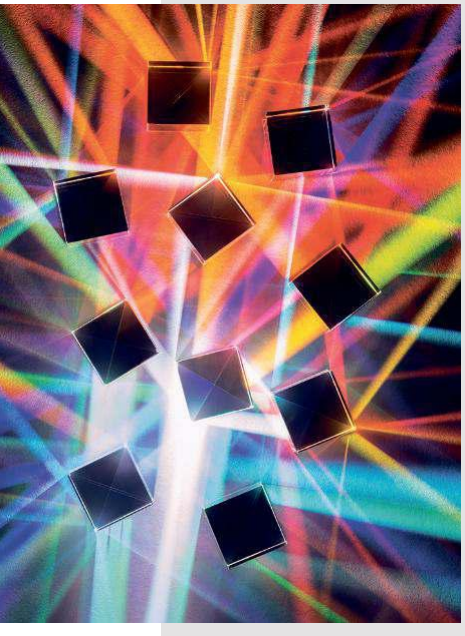
Un lampo radio per studiare l'universo

Questi fenomeni ancora misteriosi possono essere usati per indagini cosmologiche

Un viaggio iniziato un miliardo di anni fa in una lontana galassia. È la storia di FRB150807, il più brillante lampo radio osservato, catturato l'anno scorso dai radiotelescopi dell'osservatorio Parkes in Australia. I lampi radio veloci, o *fast radio bursts* (FRB), sono fenomeni astronomici ancora misteriosi. Ma grazie alla sua eccezionale brillantezza, FRB150807 è stato usato per sondare lo spazio intergalattico, mostrando che è riempito da gas poco turbolento immerso in campi magnetici poco intensi. Lo studio, pubblicato su «Science» da Vikram Ravi del California Institute of Technology e colleghi, fornisce nuove informazioni sui FRB e mostra come possono essere usati per indagini cosmologiche.

La natura di questi rapidissimi lampi radio resta un mistero per gli astrofisici: questi fenomeni potrebbero essere il prodotto di violente esplosioni stellari, di fusioni fra buchi neri o stelle di neutroni, oppure nascere da processi fisici ancora ignoti. Scoperti nel 2007, i FRB noti sono solo 18, ma si stima che in tutto il cielo ve ne siano fra 2000 e 10000 al giorno, impossibili da osservare tutti per via del piccolo campo di vista dei radiotelescopi. La zona di cielo dove è apparso FRB150807 contiene solo galassie distanti, quindi gli autori deducono che il lampo arrivi da una galassia ad almeno un miliardo di anni luce da noi. Grazie alla sua brillantezza e alla sua distanza, FRB150807 si è dimostrato un utile strumento cosmologico. Il gas ionizzato presente nello spazio intergalattico influenza le proprietà delle onde radio, quindi studiando FRB150807 è stato possibile determinare le proprietà del gas fra noi e la galassia di origine. Analizzando il lampo, durato circa un terzo di millisecondo, gli autori hanno mostrato che lo spazio intergalattico è riempito da gas poco turbolento e con deboli campi magnetici, di circa 20 miliardesimi di gauss. Resta il mistero sui FRB, ma in attesa di capirne l'origine possiamo iniziare a usarli come fari nell'immenso oceano fra le galassie.

Massimiliano Razzano



Nuovo record per l'entanglement di fotoni

Fra le proprietà dei sistemi quantistici, l'*entanglement* è una delle più studiate, perché alla base delle sorprendenti capacità di elaborazione dei calcolatori del futuro: i computer quantistici. Ma per progettare computer quantistici che possano essere competitivi con gli attuali elaboratori, è necessario creare sistemi con un numero elevato di particelle entangled. Ed è in questa direzione che si muovono le ricerche del gruppo guidato da Xi-Lin Wang, della University of Science and Technology of China di Hefei, che ha portato a dieci il nuovo record di fotoni entangled. L'entanglement, noto anche con l'espressione correlazione quantistica, è un fenomeno squisitamente quantistico in cui lo stato di un sistema microscopico dipende strettamente dallo stato degli altri sistemi a cui è connesso (entangled), anche se si trovano a grande distanza fra loro. Questo significa che, per esempio, dato un sistema di due particelle entangled, qualunque misurazione su una delle due particelle altera simultaneamente anche lo stato dell'altra, a qualunque distanza si trovi dalla prima.

Per creare sistemi di fotoni entangled i fisici usano cristalli non lineari, in grado di convertire alcuni fotoni incidenti in fotoni correlati. In particolare, come descritto nell'articolo pubblicato su «Physical Review Letters», Wang e collaboratori hanno illuminato con un laser a bassa potenza un apparato ottico composto essenzialmente da coppie di cristalli di beta-borato di bario separati da lamine polarizzatrici. Grazie a questo schema ottico, hanno potuto produrre coppie di fotoni con identica polarizzazione ed emessi nella stessa direzione. Mettendo in cascata cinque di questi sistemi, i fisici sono così riusciti a raccogliere dieci fotoni entangled, aumentando l'efficienza di raccolta dal 40 per cento degli esperimenti precedenti fino al 70 per cento. Un risultato già utile per esperimenti su teletrasporto e crittografia quantistica.

Emiliano Ricci

Viviane Ponti/Getty Images (*Parkes Observatory*); MirageC/Getty Images (*entanglement*)

EPIDEMIOLOGIA

Data di nascita e suscettibilità all'influenza

I ceppi a cui si è stati esposti durante l'infanzia condizionano se e come ci si ammalerà in futuro

Peter Dazeley/Getty Images

Quando si diffonde un'epidemia di influenza, non tutti reagiscono allo stesso modo: alcune fasce di popolazione possono essere particolarmente colpite dall'infezione, mentre altre ne escono quasi indenni. Durante la pandemia di influenza aviaria che si è diffusa dal 1997, causata dal virus H5N1, si sono ammalati soprattutto bambini e adulti, mentre alcuni anni dopo il ceppo virale H7N9 ha colpito in particolare le persone più anziane.

La diversa suscettibilità ad ammalarsi, rivela una ricerca pubblicata su «Science» da Michael Worobey dell'Università dell'Arizona a Tucson e colleghi, sembra legata al ceppo influenzale da cui si è stati infettati nell'infanzia. La prima infezione da virus influenzale conferisce una forma di immunità anche verso altri sottotipi virali che appartengono allo stesso gruppo. Quando però si diffonde un virus di un altro gruppo, la protezione viene meno e le persone sono più esposte alla malattia. I virus responsabili dell'influenza possono essere divisi in due gruppi, in base a particolari molecole presenti sulla superficie che attivano una precisa risposta immunitaria: un gruppo comprende i sottotipi H1, H2 e H5, e l'altro i sottotipi H3 e H7.

Gli autori dello studio hanno analizzato i casi di infezione nel corso di una serie di pandemie influenzali, dal 1918 al 2015. Analizzando i dati epidemiologici, gli scienziati hanno osservato che per circa 50 anni le epidemie influenzali sono state causate da virus del primo gruppo, mentre nel 1968 ha iniziato a diffondersi un virus del secondo gruppo. Le persone nate prima di quella data hanno quindi una forma di immunità verso il virus H5N1, del primo gruppo, mentre hanno più probabilità di ammalarsi a causa del ceppo H7N9. Viceversa, chi è nato dopo il 1968 ha un profilo di suscettibilità di tipo opposto. Questa forma di memoria immunologica non fornisce una protezione completa, ma riduce del 75 per cento il rischio di una grave infezione e dell'80 per cento il rischio di morte. I risultati potrebbero aiutare a valutare le conseguenze di pandemie influenzali sulla popolazione.

Valentina Daelli

Sigarette e mutazioni

Fumare un pacchetto di sigarette al giorno provoca in ogni cellula polmonare una media di 150 mutazioni all'anno. A stabilirlo è uno studio pubblicato su «Science» che ha analizzato più di 5000 casi di tumore di pazienti fumatori e non fumatori rivelando che il tabacco causa mutazioni genetiche sia in modo diretto, nelle cellule a contatto con il fumo, sia in modo indiretto, alterando almeno cinque differenti meccanismi di regolazione genica.

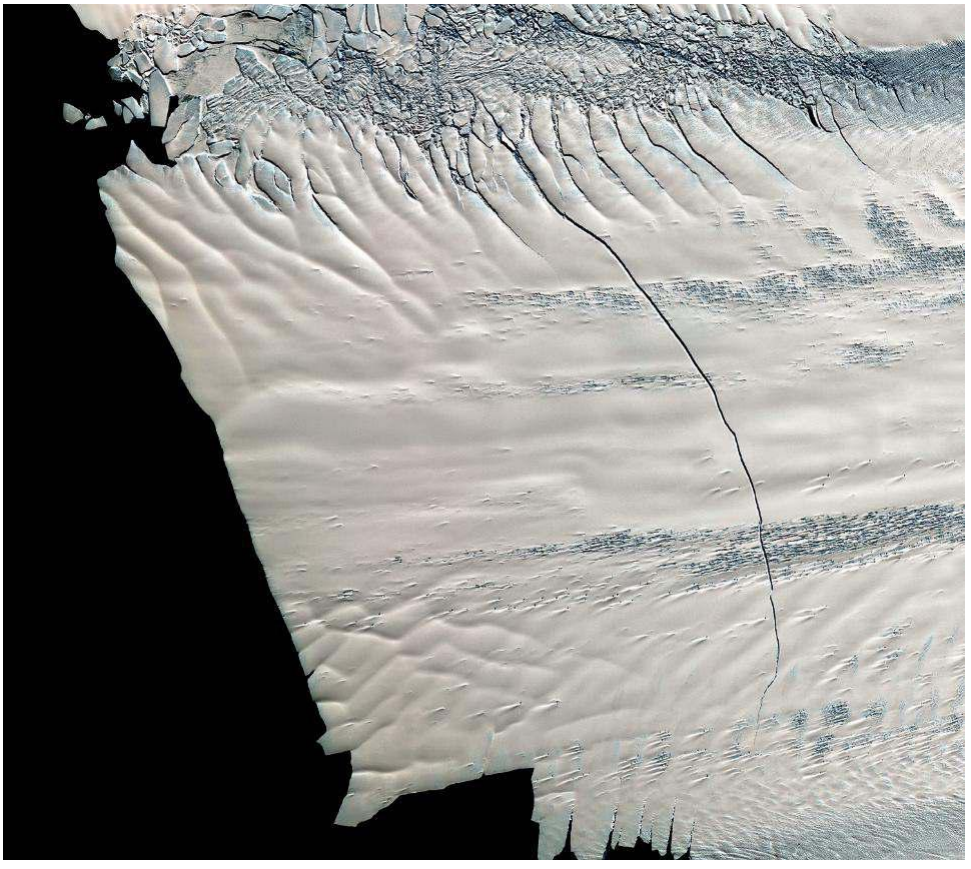
In particolare, in base ai dati raccolti da Ludmil Alexandrov e colleghi del Wellcome Trust Sanger Institute, sembra che il tabacco sia all'origine di ben 17 tipologie diverse di tumore che non riguardano solo i polmoni: con un pacchetto di sigarette al giorno, in media, le mutazioni che si sviluppano nell'arco di un anno in ogni cellula sono 97 nel caso della laringe, 39 della faringe, 23 della bocca, 18 della vescica e 6 del fegato. Ovviamente il numero esatto di mutazioni in ciascuna cellula varia da individuo a individuo, ma la correlazione è chiara e mostra una proporzionalità diretta tra numero di sigarette fumate e il rischio di sviluppare un tumore. A differenza degli studi precedenti che già evidenziavano la correlazione, questo è uno dei primi che riesce a quantificare con precisione i cambiamenti molecolari che avvengono nel DNA per effetto del tabacco.

Mattia Maccarone

CLIMA

Fusioni difficili da fermare

Solo raffreddamenti prolungati degli oceani potrebbero salvare i ghiacciai a contatto con i mari



Oggi è evidente la fusione dei ghiacci (che spesso è chiamata impropriamente «scioglimento») un po' in tutto il mondo: ovviamente al Polo Nord, ma anche sulle catene montuose, nonché in Groenlandia e nella penisola antartica occidentale (il resto dell'Antartide sembra molto più resistente e solido).

La dinamica di questi ghiacciai è molto complessa ma, almeno per quelli a contatto con il mare, riveste grande importanza la temperatura dell'oceano circostante, che negli ultimi decenni ha mostrato una netta tendenza all'aumento.

Ma se potessimo riabbassare questa temperatura, che cosa succederebbe? Possiamo provare a rispondere a questa domanda analizzando che cosa è successo a uno specifico ghiacciaio antartico negli ultimi anni, quando la parte di oceano che lo bagna ha mostrato un temporaneo raffreddamento. È quello che hanno fatto Knut Christianson, dell'Università di Washington a Seattle, e colleghi in uno studio sul ghiacciaio antartico di Pine Island pubblicato di recente su «Geophysical Research Letters».

Ebbene, nonostante negli anni 2012 e 2013 si sia misurata una diminuzione del contenuto di calore dell'oceano circostante di circa il 60 per cento, il tasso di fusione del ghiaccio si è ridotto solo del quattro per cento e il ghiacciaio ha continuato a «gettare» in mare tanta acqua. Si pensi che oggi il ghiacciaio di Pine Island è considerato quello che dà il maggior contributo all'aumento del livello del mare: circa il quattro per cento con un aumento annuo a esso dovuto di 0,11 millimetri.

In questa situazione si deve concludere che solo raffreddamenti più prolungati dell'oceano potrebbero influire in maniera sostanziale sulla dinamica dei ghiacciai e fermarne la fusione. Ma ricordiamo che l'unico modo anche solo per bloccare l'aumento di temperatura degli oceani è ridurre i nostri influssi negativi sul clima. Purtroppo però, il fatto che l'acqua abbia una grossa capacità termica, che si traduce in una grande resistenza ai cambiamenti di temperatura, rende gli effetti delle nostre azioni molto lenti.

Antonello Pasini

Emissioni stabili di anidride carbonica

Per il terzo anno di fila le emissioni di CO_2 segneranno il passo, dopo essere cresciute fra il 2003 e il 2013 a una media del 2,3 per cento all'anno. Lo sostiene la climatologa Corinne Le Quéré, dell'Università dell'East Anglia, con il contributo del Global Carbon Project, che raccoglie i dati sulle emissioni. Estrapolando i dati per il 2016 fino alla fine dell'anno, Le Quéré ha concluso, su «Earth System Science Data», che l'aumento delle emissioni sarà dello 0,2 per cento, contro lo zero del 2015 e un aumento dello 0,7 per cento nel 2014, nonostante una crescita totale del nove per cento dell'economia mondiale tra il 2014 e il 2016. «Tre anni di fila di quasi stasi nelle emissioni, in un periodo di buona crescita economica, non si erano mai visti», sottolinea la ricercatrice. Nel 2016 Cina e Stati Uniti dovrebbero aver emesso meno, soprattutto per il progressivo abbandono del carbone. Le emissioni europee dovrebbero essere leggermente aumentate per l'uscita dalla crisi economica, mentre non mostra segni di rallentamento la crescita del cinque per cento all'anno delle emissioni indiane. «Fermare le emissioni però non è abbastanza per mantenere l'aumento delle temperature globali sotto i 2°C rispetto al 1850. È necessario che le emissioni comincino presto a diminuire», conclude Le Quéré.

Alex Saragosa

Cortesia NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, e U.S./Japan ASTER Science Team (*ghiacciaio Pine Island*); DEA/A. Dagli Orti/De Agostini/Getty Images (*ricostruzione volto Neanderthal, a fronte in alto*); cortesia Alain Herzog/EPFL (*sistema wireless, a fronte in basso*)

GENETICA

Il Neanderthal che è in noi

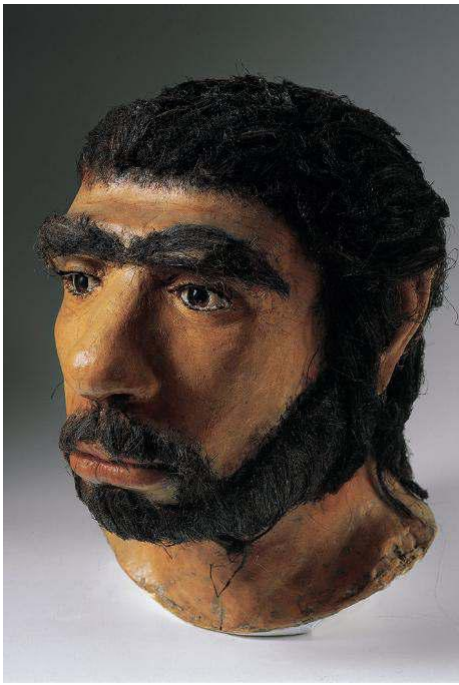
Due studi illustrano l'azione della selezione naturale sul DNA neanderthaliano nel nostro genoma

Decine di migliaia di anni fa, poco dopo l'uscita dall'Africa, l'uomo moderno entrò in contatto e si ibridò con due specie affini: l'uomo di Neanderthal e quello di Denisova. Tracce di quegli incroci sono ancora evidenti nel nostro patrimonio genetico, poiché il genoma delle popolazioni umane non africane contiene una piccola parte, stimata in 2-5 per cento in base all'area geografica, del DNA di queste specie estinte.

Dal sequenziamento di 150 genomi provenienti da popolazioni diverse, uno studio su «Current Biology» diretto da Joshua M. Akey dell'Università di Washington ha mostrato che le varianti genetiche arcaiche che si sono mantenute fino a oggi sono state utili all'uomo moderno per adattarsi meglio alle condizioni ambientali fuori dall'Africa. Sebbene le sequenze di derivazione neanderthaliana e denisovana costituiscano in media una bassa porzione del genoma umano, in oltre 120 loci la frequenza di queste sequenze può raggiungere anche il 65 per cento. È quindi probabile che questi alleli, originatisi nell'ambiente in cui questi ominidi erano ben adattati, siano stati, e forse lo sono ancora, vantaggiosi anche per la nostra specie. Non è un caso che molti di questi geni siano legati al funzionamento del sistema immunitario.

La restante parte del DNA acquisito in seguito agli eventi di ibridazione è andata perduta nel tempo. Secondo uno studio diretto da Ivan Juric dell'Università della California a Davis e pubblicato su «PLoS Genetics», le varianti geniche di origine neanderthaliana, comprese quelle con mutazioni neutrali, sono state eliminate dal genoma quando non costituivano un vantaggio per la nostra specie. Gli alleli non fondamentali si sarebbero diluiti nella popolazione umana, molto superiore a quella piccola dei Neanderthal che avrebbe invece mantenuto la gran parte delle varianti deleterie, da essere di fatto oggi scomparsi. La selezione naturale avrebbe quindi da un lato promosso il consolidamento degli alleli esogeni nelle popolazioni in cui era necessario, dall'altro, sfavorito il mantenimento di quelli anche minimamente svantaggiosi.

Andrea Romano



Ricominciare a camminare con il wireless

Le persone che soffrono di una paralisi alle gambe dovuta a un danno del midollo spinale non hanno speranze di tornare a camminare in modo autonomo. O, meglio, non ne avevano. Ora, però, uno studio effettuato dal Centro di neuroprostetica e dal Brain Mind Institute dell'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), apre nuove prospettive anche per queste persone. Un gruppo guidato dal neuroscienziato Grégoire Courtine è riuscito a restituire l'uso della gamba posteriore destra a due esemplari di macaco Rhesus (*Macaca mulatta*) con un danno del midollo spinale. Lo studio è stato pubblicato da «Nature». Il primo autore, Marco Capogrosso, anche lui all'EPFL, ci ha spiegato come si è giunti al risultato: «L'idea di base consiste nel considerare il sistema nervoso come un circuito elettrico: quando un'interruzione impedisce la trasmissione dello stimolo nervoso basta creare un bypass per ripristinarla».

Un concetto molto semplice, ma difficile da realizzare: per camminare bisogna coordinare, con estrema precisione, una quarantina di muscoli che muovono le articolazioni coinvolte, anca, ginocchio, caviglia. «Il midollo spinale – dice ancora Capogrosso – è un insieme di reti che servono per attivare e coordinare questi muscoli e che restano capaci di produrre il movimento anche al di sotto della lesione spinale. Abbiamo quindi messo a punto un metodo per riportarle alla loro funzione». Il sistema consiste in un microelettrodo applicato sulla corteccia motoria del cervello e in un sistema di stimolazione inserito nella colonna vertebrale, in zona epidurale, al di sotto della lesione midollare. Il segnale raccolto sulla corteccia motoria è inviato, con una connessione *wireless*, a un sistema di controllo esterno che lo decodifica e lo rispedisce allo stimolatore,

modulandolo con la massima precisione per controllare i movimenti di flessione ed estensione della zampa. Appena sei giorni dopo l'impianto i macachi hanno ripreso gradualmente a camminare, pur con una lieve zoppia, caricando il peso del corpo sull'arto malato. Il prossimo obiettivo è iniziare trial su esseri umani. «In una decina di anni potremmo arrivare a una soluzione commerciale – dice Capogrosso – il grande ostacolo sarà però trovare i finanziamenti necessari».

Riccardo Oldani

Quando il cane cambiò la dieta

Con la nascita dell'agricoltura, circa 10.000 anni fa, a cambiare non furono solo le abitudini alimentari degli esseri umani, ma anche quelle dei cani. Già domesticati da qualche migliaio di anni, i cani si convertirono a una dieta ricca di cereali grazie a un adattamento genetico che permise di digerire l'amido. Lo affermano su «Royal Society Open Science» Morgane Ollivier della Ecole Normale Supéieure de Lyon e colleghi. Oggi, nel genoma dei cani ci sono tra 4 e 34 copie di *Amy2B*, gene per la digestione dell'amido, mentre la maggior parte di lupi e dingo ne ha solo due. Per capire se l'amplificazione di *Amy2B* fosse un adattamento emerso nei cani in risposta alla vita agricola o un prodotto più recente della selezione umana, i ricercatori hanno esaminato il DNA di denti e ossa di 13 cani vissuti in Europa e Asia sud-occidentale tra 15.000 e 4000 anni fa. Le analisi hanno mostrato che, già 7000 anni fa, i cani che vivevano in aree agricole avevano più di otto copie di *Amy2B*. È la prova che la selezione naturale favorì l'amplificazione del gene nel DNA canino perché questo carattere permetteva di sfruttare la nuova risorsa energetica rappresentata dai cereali. Così, il sodalizio tra uomini e cani è proseguito sino ai nostri giorni. (**MaSa**)

Tracce di vita sulla Terra dei primordi

Tre miliardi e 200 milioni di anni fa la Terra era molto diversa da come la conosciamo, ma già ospitava la vita, non solo negli oceani ma anche sulla terraferma. È lo scenario che emerge da un recente studio che descrive una delle più antiche formazioni rocciose a noi note, scoperta nella località di Barberton in Sudafrica, che mostra chiare tracce di un paleosuolo fossile modellato dalle attività metaboliche di antichi organismi. Lo studio, effettuato dal gruppo di Sami Nabhan della Freie Universität Berlin e pubblicato su «Geology», indica che la colonizzazione delle terre emerse sarebbe avvenuta almeno 300 milioni di anni prima di quanto si ritenesse in precedenza.

Gli strati più antichi delle formazioni di Barberton sono datati a 3,5 miliardi di anni fa, ma è a partire da quelli risalenti a 3,2 miliardi di anni fa che si osservano granuli di pirite, la cui genesi appare legata all'attività di microrganismi unicellulari. Composizione isotopica della roccia, forma dei cristalli di pirite e disposizione degli strati testimoniano un paleosuolo formatosi in una pianura attraversata da fiumi che trasportavano i sedimenti al mare. Questo pionieristico ecosistema del mondo emerso era soggetto a variazioni stagionali di umidità, registrate dai segni di accrescimento sui bordi dei granuli. (**FaPe**)

I colori degli uccelli

Gli uccelli sono il gruppo di vertebrati più colorato. Ora un'analisi dei piumaggi di 137 specie in due famiglie di uccelli, pubblicata da Nicholas Friedman dell'Okinawa Institute of Science and Technology su «Global Ecology and Biogeography», suggerisce che il clima sia il principale determinante della colorazione.

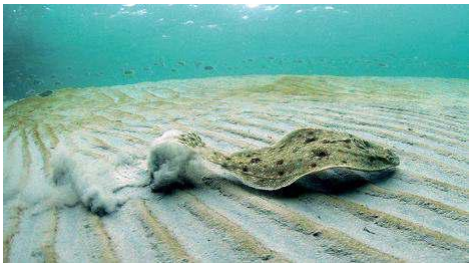
Gli scienziati hanno ritenuto spesso che più ci si avvicina ai tropici più i colori sono vivaci, ma in realtà le regioni pluviali sono abitate prevalentemente da uccelli scuri, mentre gli uccelli degli habitat aridi sfoggiano più spesso piumaggi chiari e variegati. Questa correlazione potrebbe dipendere dal mimetismo, che avvantaggia colori scuri nelle ombrose foreste pluviali e colori chiari in ambienti luminosi come i deserti, e dalla competizione per l'accoppiamento, che negli ambienti più aridi sono concentrati nella breve stagione delle piogge. La necessità di attrarre un partner rende la competizione intensa, spingendo l'evoluzione di piumaggi vivaci. (**MaSan**)

Cervelli che non si emozionano con la musica

Fin dai tempi remoti gli esseri umani hanno trovato piacere nella musica, ma ci sono individui ai quali la musica non suscita alcuna emozione. Il disturbo è chiamato anedonia musicale e secondo uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» ha origine in anomalie nella connessione fra le aree uditive del cervello e quelle legate alle emozioni. La scoperta, oltre a spiegare l'origine del disturbo, fa luce anche sui processi cognitivi che normalmente rendono la musica un elemento così importante per la psiche umana. Secondo Noelia Martínez-Molina dell'Università di Barcellona e colleghi, i soggetti colpiti da anedonia musicale hanno facoltà uditive normali e non mostrano anomalie nel provare piacere in risposta ad altri stimoli, a riprova che i circuiti deputati all'elaborazione del piacere e delle ricompense sono preservati. Ma al contrario della maggioranza della popolazione, in questi individui l'attività del nucleo accumbens è assai ridotta solo per gli stimoli musicali. Il nucleo accumbens è un centro cerebrale importante nel network del piacere. Per gli autori, quello che manca è la connessione fra le aree uditive e questo nucleo, la stessa connessione che garantisce negli altri individui il piacere della musica e che probabilmente è stata selezionata dall'evoluzione. (**FeSg**)

Amy Rene/Shutterstock (*cane*); mooinblack/Shutterstock (*uccelli*); Randy Faris/Getty Images (donna con le cuffie)

Il tempo per una sogliola



Le 700 specie di pesci piatti come sogliole e platesse sono un esempio eccezionale di adattamento evolutivo. Durante lo sviluppo, uno degli occhi migra da un lato all'altro del corpo, permettendo di vivere adagiati sul fondale. Una soluzione anatomica di successo. Finora tuttavia non era chiaro se si fosse evoluta più volte in modo indipendente.

Un gruppo guidato da Richard C. Harrington dell'Università di Oxford ha pubblicato su «BMC Evolutionary Biology» un albero filogenetico in cui si conclude che tutti i pesci piatti discendono da un progenitore comune. Il confronto in 45 specie di oltre 1000 elementi di DNA ultraconservati, integrata dai reperti fossili, suggerisce inoltre una evoluzione rapidissima, soprattutto per un cambiamento morfologico così radicale, che avrebbe richiesto meno di tre milioni di anni. Per confronto, lo sviluppo dell'anatomia umana moderna ha richiesto circa sette milioni di anni. (MaSan)

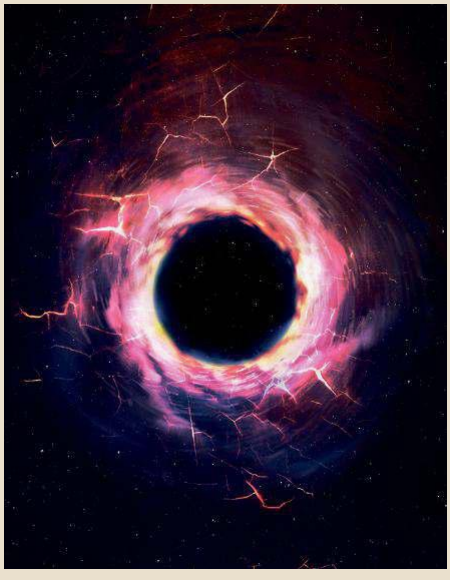
Materia luminosa e rotazione galattica

La materia oscura fu ipotizzata per spiegare l'aspetto delle curve di rotazione delle galassie a spirale. Da quel momento, questa materia non visibile, ma di cui le stelle sentono la presenza gravitazionale, è diventata fondamentale per i cosmologi, tanto da essere invocata nell'ambito della teoria del big bang per rendere conto del 27 per cento della materia-energia dell'universo.

Adesso una ricerca su 153 galassie a disco, la cui composizione si pensa sia dominata dalla materia oscura, rivela una relazione stretta fra la dinamica di rotazione e la materia luminosa. In particolare, lo studio, pubblicato su «Physical Review Letters» da un gruppo guidato da Stacy McGaugh, della Case Western Reserve University di Cleveland, mostra una relazione fra accelerazione centripeta (a ogni raggio) delle galassie e distribuzione della materia luminosa. Questa relazione è così netta da far ipotizzare l'esistenza di una legge universale a determinarla. La scoperta rivela che, nelle galassie, le distribuzioni di materia ordinaria e di materia oscura sono molto più connesse di quanto si pensasse. Curioso, tuttavia, che questa relazione sia stata per la prima volta prevista dalla teoria MOND (Modified Newtonian Dynamics), una teoria della gravitazione modificata proposta proprio come alternativa alla materia oscura. (EmRi)

Un buco nero… seminudo

Tutte le osservazioni, incluse le più recenti effettuate dal gruppo guidato da James Condon, dello statunitense National Radio Astronomy Observatory, confermano che i buchi neri supermassicci si trovano al centro dei nuclei galattici. Le osservazioni di Condon e colleghi erano mirate a individuare coppie di buchi neri supermassicci decentrati rispetto al nucleo galattico in conseguenza della fusione di due galassie. Ma durante le osservazioni, effettuate con i radiotelescopi del Very Long Baseline Array (VLBA), hanno scoperto un buco nero circondato da una galassia debole e ridotta rispetto a quello che in genere si osserva attorno a buchi neri di quella taglia. L'ipotesi, descritta su «The Astrophysical Journal», è che quest'oggetto, attualmente in fuga dalla galassia più brillante dell'ammasso di galassie alla velocità di oltre 2000 chilometri al secondo, si trovasse al centro di una galassia satellite entrata in collisione con la galassia principale. La quale ha strappato gran parte delle stelle dal sistema satellite, lasciando il buco nero seminudo. Secondo i ricercatori, entro un miliardo di anni questo buco nero sarà privo di materia residua



attorno, diventando così invisibile. Una scoperta che svela la possibile esistenza di una ricca popolazione di buchi neri nascosti alla nostra vista perché ormai nudi a causa di scontri galattici. (EmRi)

Meno ghiaccio, Alpi più alte

Le Alpi sono nate grazie alla spinta che la placca di crosta terrestre africana esercita contro quella euroasiatica. Ma questo meccanismo non spiega perché le Alpi, in particolare quelle orientali, crescano di circa 2 millimetri all'anno, nonostante l'erosione di fianchi e vette compensi quasi esattamente la spinta tettonica. In passato si è ipotizzato che le Alpi, via via alleggerite dall'erosione, fossero spinte in alto anche dal mantello fluido sottostante, più libero di espandersi. Ma ora una ricerca dei geologi Dirk

Scherler e Taylor Schildgen, del GeoForschungsZentrum di Potsdam, ha trovato un responsabile diverso. Come riportato su «Nature Communications», i due hanno calcolato che fra il picco dell'ultima era glaciale, 18.000 anni fa, e oggi, le Alpi hanno perso 62.000 miliardi di tonnellate di ghiaccio, mentre nello stesso periodo la perdita di rocce e terreno per erosione è stata di appena 4000 miliardi di tonnellate. A provocare l'attuale crescita delle Alpi, quindi, è stato soprattutto il cambiamento climatico post glaciazione, ma non c'è da aspettarsi che l'aumento delle temperature globali faccia accelerare la crescita: l'80 per cento della perdita di ghiaccio è avvenuta nei primi 3000 anni di disgelo. (FeSg)

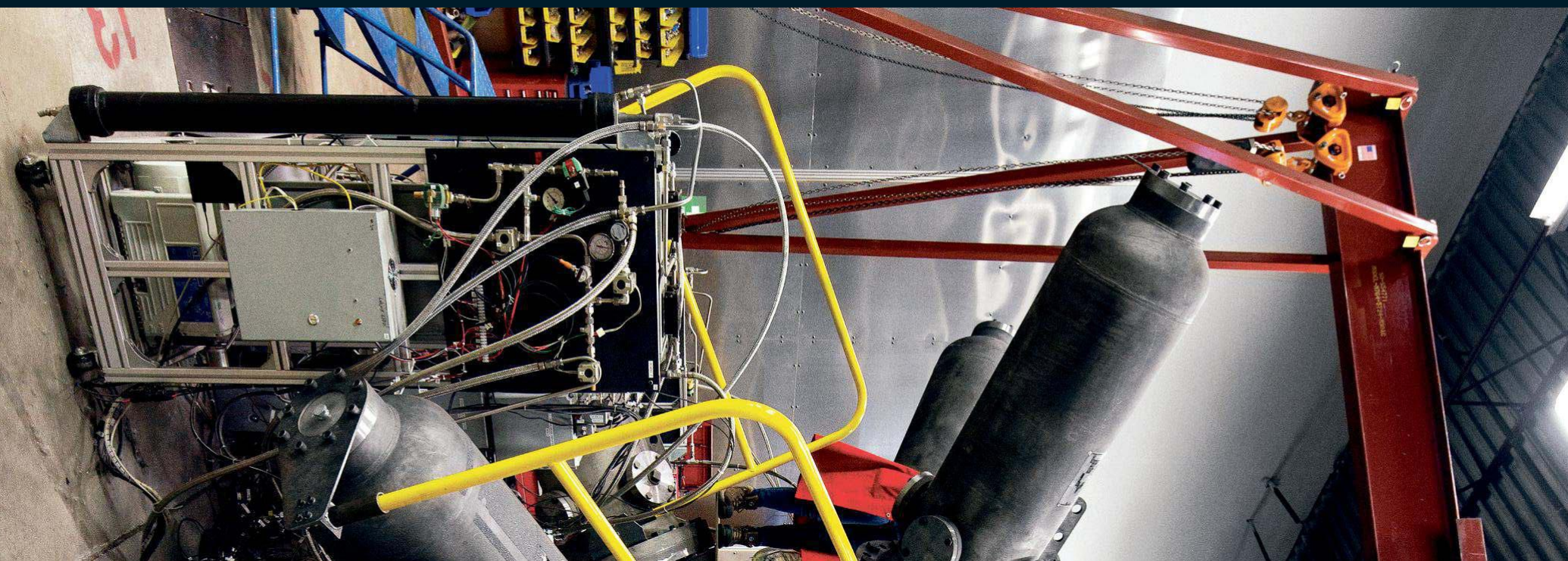
Beth Swanson/Shutterstock (*platessa*); Peter Stein/Shutterstock (*Alpi svizzere*); Vadim Sadovski/Shutterstock (*buco nero*)

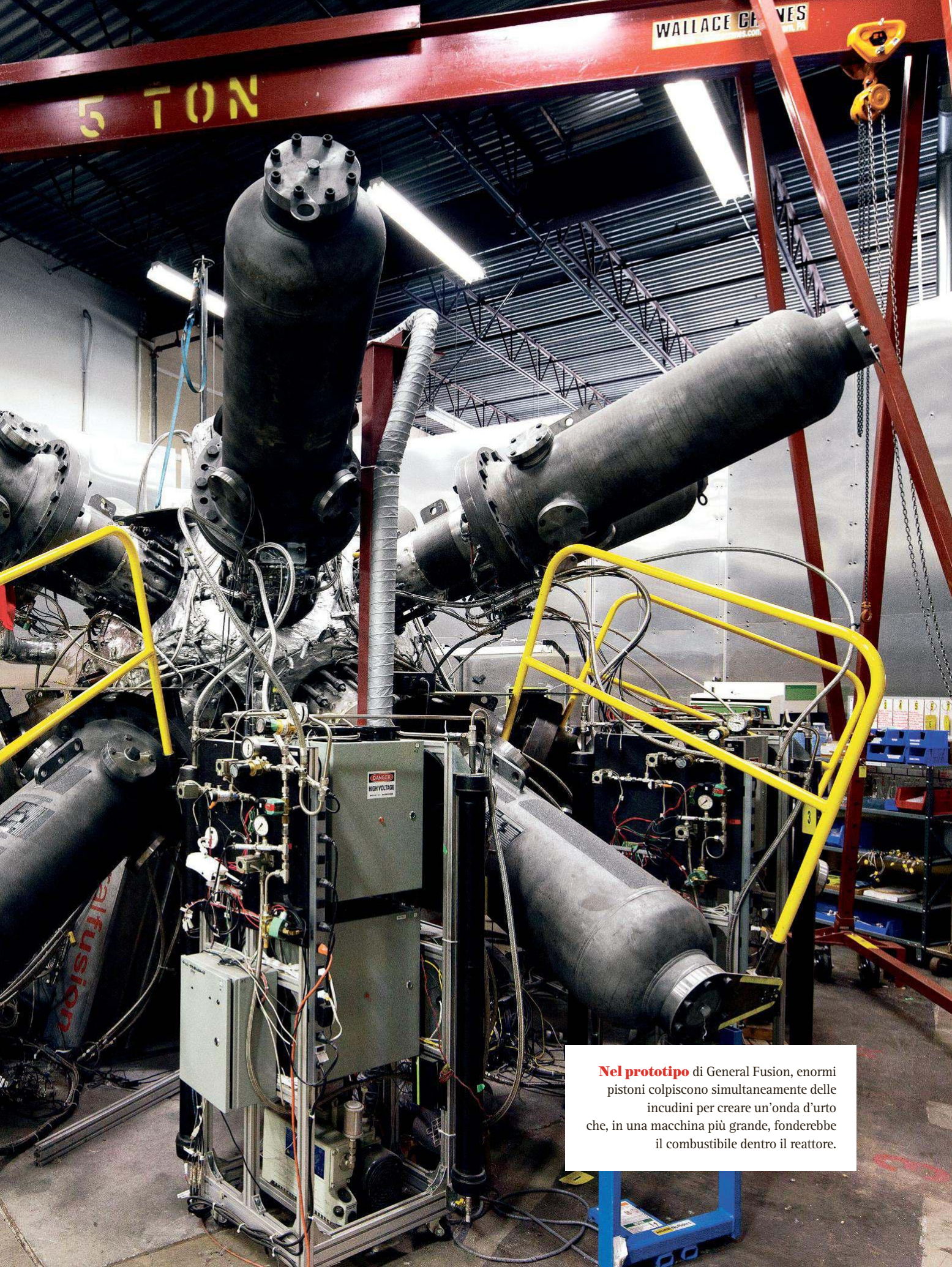
ENERGIA

LE NUOVE FRONTIERE DELLA FUSIONE

Alcuni fisici coraggiosi, in qualche caso finanziati da miliardari, stanno esplorando strade più rapide ed economiche verso la fonte perfetta di energia pulita

di W. Wayt Gibbs





Nel prototipo di General Fusion, enormi pistoni colpiscono simultaneamente delle incudini per creare un'onda d'urto che, in una macchina più grande, fonderebbe il combustibile dentro il reattore.

W. Wayt Gibbs lavora a Seattle come scrittore scientifico freelance ed *editor*. È *contributing editor* per «Scientific American» e direttore editoriale di Intellectual Ventures, società di ricerca e investimenti che ha uno *spin-off* attivo nel campo della fissione (non della fusione) nucleare.

Seduto nella sala di controllo del reattore sperimentale a fusione di Tri Alpha Energy, davanti allo schermo con le scritte «cannoni al plasma» e «controllo dello sparo», mi sento leggermente ansioso mentre ci prepariamo a fare fuoco. Questo reattore è un prototipo iniziale di una centrale elettrica che genererebbe energia con una versione controllata del processo che avviene nelle stelle e nelle bombe H.

Nel video in alto vedo gli addetti sul pavimento di questo anonimo magazzino vicino a Irvine, in California, che dal grande reattore si dirigono verso le porte. La camera a vuoto al centro del reattore, lucida, cilindrica e lunga circa come due scuolabus uno dietro l'altro, è circondata da due dozzine di elettromagneti ad anello, ciascuno più alto di me e largo come una mia gamba. Al mio comando, dentro quella camera la temperatura aumenterà fino a 10 milioni di gradi, anche se solo per un istante.

«Spinga quel tasto», mi dice l'operatore. Eseguo.

In un palazzo adiacente, quattro batterie a volano, caricate questa mattina con l'energia della rete locale, rilasciano un picco di elettricità da 20 megawatt. La corrente energizza i magneti ad anello e carica file di grossi condensatori, preparandoli all'enorme scarica imminente. In due minuti, tutti gli indicatori sul mio schermo sono passati da «In preparazione» ad «Armato».

L'operatore si avvicina a un microfono. «Pronti all'innesco», dice all'altoparlante. Le spie cominciano a lampeggiare. Porto il cursore sul tasto con la scritta «Innesco». Quindi spingo.

In un microsecondo i condensatori rilasciano l'elettricità accumulata. Alle estremità opposte del cilindro a vuoto si creano nuvole di ioni idrogeno e sono inviate a quasi un milione di chilometri all'ora verso il centro, dove collidono formando un plasma caldo e rotante che somiglia a un enorme sigaro vuoto.

Suona spettacolare, ma nella sala di controllo non ci sono lampi né boati: solo un debole «ping», come se nella camera del reattore fosse caduta una chiave sul pavimento di cemento. In un attimo l'ammasso di plasma si è dissolto e i computer hanno cominciato a elaborare il gigabyte di dati in arrivo da decine di sensori nel reattore. Le spie si spengono, gli addetti tornano al lavoro.

Un altro tentativo di fusione. Quando se ne fanno anche 100 al giorno, come per Tri Alpha, uno in più non è niente di speciale.

Dopo 50.000 piccoli «ping» in soli due anni, al momento della mia visita, nel febbraio 2016, la macchina di prova C-2U aveva dato a Tri Alpha i dati per andare avanti. Ad aprile il fisico Michl Binderbauer, *chief technology officer* dell'azienda, ha detto agli ingegneri di smontarlo e cannibalizzarne i pezzi per costruire un reattore più avanzato, C2-W, che dovrebbe essere finito a metà 2017.

Il metodo Tri Alpha – costruire un prototipo rapidamente, testarlo a sufficienza e poi sostituirlo con uno migliore – rappresenta una differenza notevole rispetto alla norma nella ricerca sulla fusione. Da decenni gli scienziati progettano macchine gigantesche che puntano a fare luce sui comportamenti misteriosi dei plasmi roventi e pressurizzati che dovrebbero generare reazioni di fusione, ma spesso non lo fanno. Binderbauer, figlio di un imprenditore viennese, è l'esempio di un nuovo approccio alla fusione, spinto dagli investitori, con una mentalità ingegneristica che non perde di vista l'obiettivo di costruire una centrale elettrica di utilità pratica, non un monumento alla fisica delle alte energie.

Analogamente altre *start-up*, come General Fusion, vicino a Vancouver, scommettono sulla costruzione di una macchina commerciale senza dover sviscerare ogni dettaglio di questa scienza complessa. Queste centrali a fusione sarebbero alimentate da combustibili derivati dall'acqua degli oceani o da minerali comuni, quasi inesauribili e privi di carbonio. Le centrali quindi non produrrebbero quasi gas serra. Inoltre porrebbero un rischio di fatto nullo di radiazioni o di impiego a scopi bellici, e genererebbero elettricità sufficiente per le città: tutto il giorno, tutti i giorni. I nuovi pionieri non devono fare altro che risolvere alcuni dei più difficili problemi di fisica e ingegneria affrontati dall'umanità.

Al momento i pragmatici hanno l'attenzione delle persone perché gli accademici sono finiti in vicoli ciechi: enormi reattori che hanno chiarito qualche aspetto della fusione ma, almeno fino a metà del secolo, non saranno in grado di fornire elettricità alla rete. Un esempio perfetto è la National Ignition Facility (NIF) del Lawrence Livermore National Laboratory, una macchina da 4 miliardi di dollari che colpisce minuscoli contenitori di combustibile con impulsi laser da migliaia di miliardi di watt. «La NIF spara solo qualche centinaio di colpi l'anno», racconta Binderbauer. Una centrale elettrica dovrebbe spararne decine di migliaia al giorno. Il sistema si è dimostrato utile per la ricerca bellica (il suo scopo principale), ma la produzione energetica dovrebbe aumentare di quasi 30.000 volte solo per compensare il consumo necessario al funzionamento dei laser, e molte volte di più per avere un'utilità commerciale. Due anni fa Livermore ha abbandonato il progetto di un prototipo di centrale elettrica.

Il secondo esempio scoraggiante è ITER, una macchina alta come un palazzo di dieci piani, che un consorzio di paesi sta realizzando in Francia. Si baserà su giganteschi magneti superconduttori per gestire la combustione di un plasma a circa 150 milioni di gradi per alcuni minuti alla volta. Anche in caso di successo, ITER non produrrà elettricità.

IN BREVE

I grandi progetti per la fusione, come ITER in Francia e NIF negli Stati Uniti, hanno consumato miliardi di dollari e sono ancora molto lontani dal generare energia sufficiente a sostenere il proprio funzionamento, per non parlare della produzione commerciale di energia.
Adesso si lavora a progetti più semplici, in alcuni casi da parte di società private. I risultati preliminari fanno sperare in strade più pratiche e meno costose verso le centrali a fusione nucleare.
I nuovi arrivati devono superare però ostacoli scientifici proibitivi: per esempio evitare che nei plasmi surriscaldati la turbolenza ponga fine subito alle reazioni di fusione. Anche il passaggio da brevi esperimenti a un funzionamento costante e affidabile necessario per le centrali elettriche pone difficoltà ingegneristiche straordinarie.

Michel Laberge, fondatore e chief scientist di General Fusion, presenta uno strumento diagnostico che può aiutare a testare proprietà fisiche non dimostrate. Commenta: «Ci sono molte possibilità di avere una brutta sorpresa... O una bella».

I politici che hanno lanciato ITER nel 2006 prevedevano un costo di 11 miliardi di dollari e la conclusione dei lavori entro il 2016. A maggio 2016 la spesa si era ormai gonfiata fino a 20 miliardi di dollari, con gli Stati Uniti in debito per circa 5 miliardi. Nella migliore delle ipotesi non sarà operativo prima del 2035. Frustrati, i senatori statunitensi hanno votato 90 a 8 per interrompere i finanziamenti. Ma dopo una successiva mozione, seppure prudente, da parte del Department of Energy, al momento della stesura di questo articolo il Congresso degli Stati Uniti era propenso a restare in gioco, almeno fino all'anno prossimo.

Messi in guardia dal progresso lentissimo dei giganti, Binderbauer e gli altri anticonformisti puntano su macchine più piccole, che affrontino il problema da nuove prospettive. Per ottenere risultati devono comprimere una minima quantità di combustibile con densità, temperatura e tempo di confinamento sufficienti a fare sì che gli atomi si fondano insieme, convertendo parte della propria massa minuscola in enormi quantità di energia. NIF e ITER si trovano alle estremità opposte in uno spettro di progetti possibili, che comprende una gamma molto ampia di densità del plasma e tempi di confinamento dell'energia (cioè il tempo per cui il calore resta nel plasma). Molti dei nuovi arrivati cercano punti più comodi nella zona intermedia, meno esplorata.

Un altro aspetto importante è che le start-up sono progettate per arrivare al successo o fallire in tempi relativamente brevi. I loro reattori sono «potenzialmente 100 volte meno costosi di ITER, più facili e rapidi da costruire e si prestano a progressi più veloci nella ricerca», spiega Scott Hsu, esperto di fusione al Los Alamos National Laboratory che collabora con la start-up HyperV Technologies. (In questo progetto, centinaia di cannoni sparano plasmi di idrogeno e argon al centro di un reattore sferico, dove implodono e comprimono il combustibile.) In questi progetti, eventuali difetti che blocchino tutto si manifesteranno con ogni probabilità prima che si rischi di perdere miliardi di dollari e decenni di tempo.

Per gli investitori è una buona notizia. I 100 milioni di dollari di cui dispone General Fusion provengono in parte dal fondatore di Amazon.com Jeff Bezos, dal governo canadese e dal fondo sovrano della Malaysia. Tri Alpha dichiara di avere raccolto centinaia di milioni di dollari da investitori tra cui Goldman Sachs e Paul Allen, cofondatore della Microsoft. Un altro gruppo che si muove rapidamente è quello dei Sandia National Laboratories, parzialmente sostenuti dall'Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) del Department of Defense, che finanzia le imprese audaci come potrebbe fare chi investe in capitale di rischio.

I sostenitori stanno facendo scommesse rischiose, ma potenzialmente assai redditizie. In effetti, la ricerca sulla fusione è piena di casi in cui «la natura dice: "bella idea, ma non funziona così"», scherza Stephen A. Slutz, capo dei teorici nel progetto Sandia.

Schiacciare il fuoco

La sfida di stabilizzare un plasma impetuoso deriva proprio dalla natura intrinseca della fusione stessa. Due nuclei atomici privati degli elettroni possono fondersi solo quando si avvicinano abbastanza e per un tempo sufficiente affinché l'attrazione della forza nucleare forte tra loro sia superiore alla repulsione elettrostatica tra i protoni. Quando accade, gli ioni si uniscono e formano un unico nucleo di un elemento più pesante, che ha una massa minore rispetto agli ingredienti originari. La materia mancante si trasforma in abbondante energia, sotto forma di fotoni e particelle subatomiche ad alta velocità. I reattori a fissione estraggono energia da atomi, come l'uranio, che invece di unirsi si scindono.

Per raggiungere alti tassi di fusione, gli ioni in un plasma devono muoversi l'uno verso l'altro velocemente, ma non troppo. In genere questo significa una temperatura del plasma superiore a 100 milioni di gradi. Un reattore deve schiacciare il plasma surriscaldato in uno spazio relativamente piccolo dentro una camera a vuoto e mantenervi i nuclei finché avvengono le reazioni. Come regola approssimativa, il prodotto tra densità del plasma e tempo di confinamento dell'energia deve essere maggiore di circa 10^{14} secondi per centimetro cubo. La combinazione possibile tra densità, tempo e temperatura è molto varia.

ITER, un progetto di reattore *tokamak*, userà un sottile plasma di circa mezzo grammo di deuterio e trizio, due isotopi dell'idrogeno ricchi di neutroni, immerso in una camera a vuoto dalle dimensioni di una piccola casa. ITER punta a una bassa densità del plasma, con un confinamento dell'energia lungo alcuni secondi.

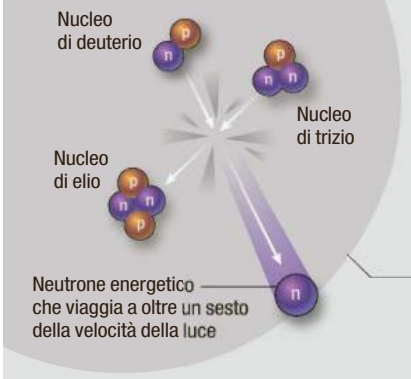
Nella NIF, invece, laser con potenza fino a 500.000 miliardi di watt sono puntati da 192 direzioni su un piccolissimo contenitore che racchiude un granello congelato di deuterio e trizio solidi. Gli strumenti ottici ed elettronici che generano e dirigono gli impulsi laser riempiono un palazzo alto 30 metri e grande come tre campi da calcio. Per raggiungere l'ignizione, stato in cui il combustibile in fusione libera energia a sufficienza per sostenere le reazioni di fusione in corso senza aiuti esterni, la NIF punta a una densità del plasma incredibilmente alta, di cui ha bisogno perché l'energia è confinata solo dall'inerzia e solo per una frazione di nanosecondo.

Per Patrick McGrath, direttore del programma dell'ARPA-E, una grande occasione potrebbe essere offerta dalla situazione, poco esplorata, tra questi due estremi: una densità del plasma moderata e tempi di confinamento dell'energia a loro volta moderati. Ma nessuna macchina è riuscita a dominare turbolenza e instabilità, due insidie che inevitabilmente si nascondono in questi plasmi. Tenere sotto controllo un plasma caldo mentre all'interno si scatena la fusione è come cercare di schiacciare la fiamma di una candela senza toccarla; anzi, è più difficile perché gli ioni in un

Fotografie di Chris Mueller

I nuovi reattori a fusione

Vari gruppi stanno costruendo prototipi di macchine per fusione che convertirebbero minuscoli frammenti di materia in enormi quantità di energia (*inserto, a sinistra*). I Sandia National Laboratories (*in basso*) e la start-up General Fusion (*in basso a destra*) vogliono creare plasmi caldi che emettono neutroni ad alta energia, convertibili in elettricità. Il metodo di Tri Alpha Energy (*in alto a destra*) genererebbe principalmente raggi X che sarebbero convertiti. I progetti presentati sono per reattori su scala commerciale.

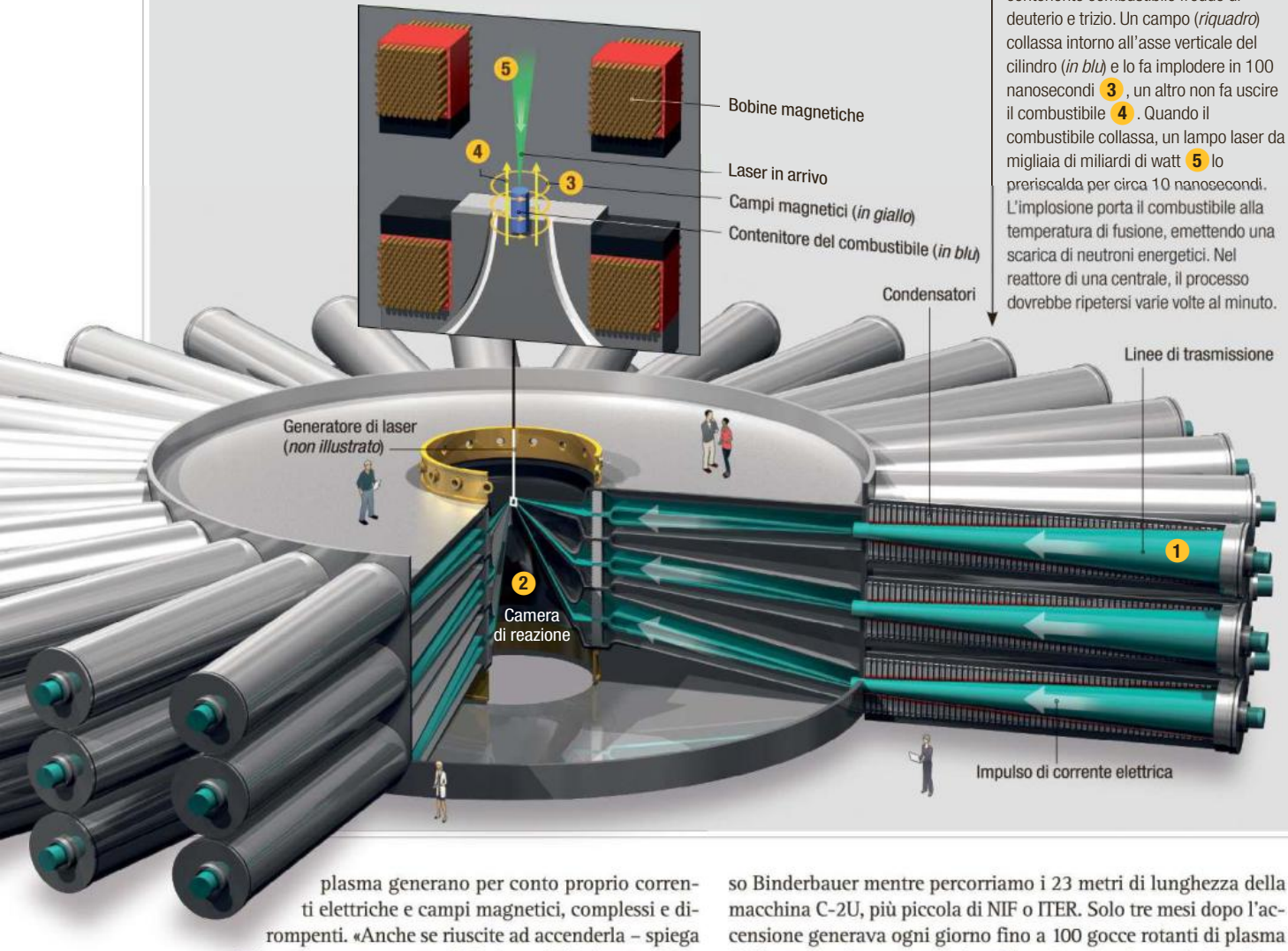


LA MATERIA DIVENTA ENERGIA

Quando due ioni (come deuterio e trizio) collidono a una certa, elevata velocità, si fondono in un nucleo di un elemento più pesante (per esempio elio) che ha una massa minore rispetto alla somma dei due ioni. La fusione trasforma la massa mancante in energia, portata via da fotoni e particelle ad alta velocità (per esempio i neutroni).

SANDIA: FUOCO AL COMBUSTIBILE

Novanta gruppi di condensatori e linee di trasmissione **1** emettono un impulso di corrente coordinato, a 65 milioni di ampere, verso la camera del reattore **2**, generando potenti campi magnetici intorno a un cilindro di metallo contenente combustibile freddo di deuterio e trizio. Un campo (*riquadro*) collassa intorno all'asse verticale del cilindro (*in blu*) e lo fa implodere in 100 nanosecondi **3**, un altro non fa uscire il combustibile **4**. Quando il combustibile collassa, un lampo laser da migliaia di miliardi di watt **5** lo preriscalda per circa 10 nanosecondi. L'implosione porta il combustibile alla temperatura di fusione, emettendo una scarica di neutroni energetici. Nel reattore di una centrale, il processo dovrebbe ripetersi varie volte al minuto.



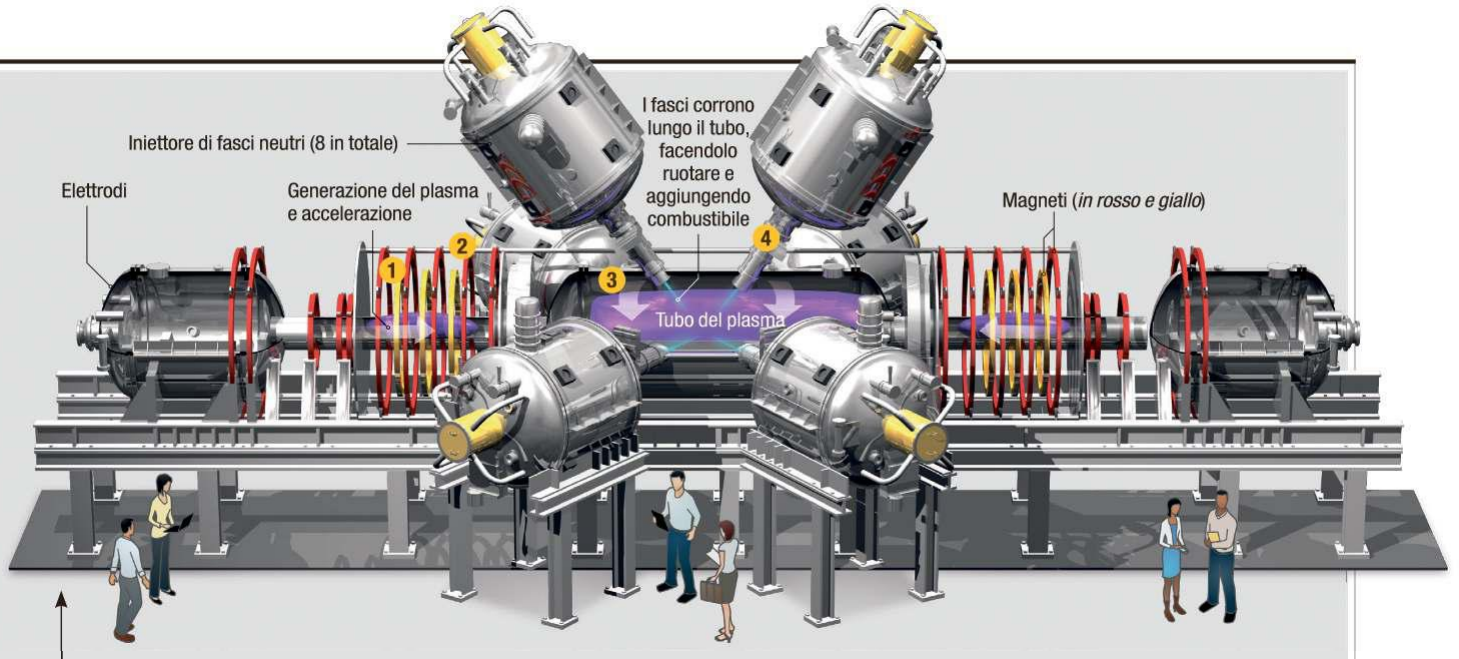
plasma generano per conto proprio correnti elettriche e campi magnetici, complessi e dirompenti. «Anche se riuscite ad accenderla – spiega Dylan Brennan, esperto di fusione del Princeton Plasma Physics Laboratory - la candela si spegne da sola».

Ecco i nuovi arrivati

Tra le start-up, Tri Alpha ha dimostrato i maggiori progressi nel mantenere costantemente il controllo del plasma. «Tutto quello che vede è stato costruito in meno di un anno», dice orgoglioso Binderbauer mentre percorriamo i 23 metri di lunghezza della macchina C-2U, più piccola di NIF o ITER. Solo tre mesi dopo l'accensione generava ogni giorno fino a 100 gocce rotanti di plasma di idrogeno, ciascuna con densità pari a circa la metà dell'obiettivo fissato dalla società, 10^{14} ioni per centimetro cubo. Le gocce sono rimaste stabili e calde per 5 millisecondi.

L'obiettivo della azienda, un plasma che ruoti al suo posto per giorni o settimane, è ancora molto lontano. Ma i test hanno sofferto limitazioni dalle forniture elettriche esterne. «Niente dice che non possa continuare fin quando vogliamo», dice Binderbauer, in

Illustrazioni di Don Foley (*reattori*) e Jen Christiansen (*diagramma delle particelle*)

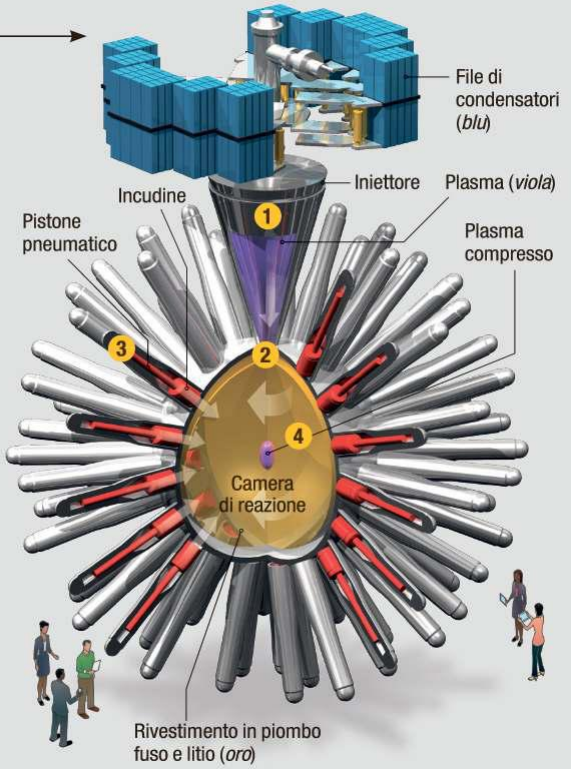


TRI ALPHA: IONI ROTANTI

Una scarica di elettricità breve e intensa energizza i magneti (*in giallo*) da entrambi i lati del nocciolo 1, trasformando uno sbuffo di combustibile gassoso in un plasma di ioni boro e protoni. Altri magneti (*in rosso*) mantengono il plasma in posizione, e un campo magnetico opposto lo investe per un microsecondo, generando una forte corrente elettrica dentro il plasma 2. Quella corrente circolare genera il proprio campo magnetico, a forma di ciambella, che funge da gabbia per tenere insieme il plasma. Quindi si invia un altro impulso di elettricità attraverso il primo gruppo di magneti, facendo accelerare gli anelli di plasma verso il centro, dove si scontrano a circa un milione di chilometri all'ora. La collisione forma un plasma a forma di tubo, più grande e caldo 3, che deve raggiungere i 3,5 miliardi di gradi per dare il via alle reazioni di fusione. Otto iniettori sparano fasci di atomi neutri nelle estremità del tubo per fare sì che continui a girare intorno al suo asse 4, aggiungendo nuovo combustibile e stabilizzando il plasma mentre brucia per ore o giorni alla volta, emettendo raggi X e nuclei di elio ad alta energia.

GENERAL FUSION: L'URTO DEL PLASMA

I condensatori alimentano un iniettore che spara un plasma di deuterio e trizio, con la forma di un anello di fumo, in un imbuto 1, comprimendolo fortemente prima che entri nella camera di reazione 2. Qui circa 200 grandi pistoni pneumatici percuotono simultaneamente delle incudini a 200 chilometri all'ora 3, generando potenti onde d'urto. Le onde attraversano velocemente un vortice di piombo fuso e litio, diffondendosi lungo la parete interna della camera 4. Quando le onde convergono al centro il vortice implode, comprimendo il plasma fino a circa 150 milioni di gradi e a una pressione superiore a 5 milioni di atmosfere, che sono sufficienti per dare il via alla fusione per una frazione di secondo. Il metallo liquido cattura i neutroni e il calore rilasciati dalla fusione. Tutto il processo si ripeterebbe una volta al secondo, generando esplosioni di neutroni energetici.



un reattore di grandi dimensioni che alimenti sé stesso oltre la rete elettrica. C-2W aggiornato includerà anche un feedback digitale per contrastare la tendenza della goccia a ondeggiare o vagare.

Hsu, che non ha legami con Tri Alpha, afferma che l'azienda ha fatto «progressi straordinari. Sostanzialmente ha risolto il problema della stabilità». Ma ottenere tempi di contenimento più lunghi – e a temperature molto più alte, mentre si pompa un flusso costante di combustibile – sarà essenziale, dato che per generare energia il reattore deve operare ininterrottamente.

Il reattore di General Fusion invece funziona a impulsi. La camera di reazione sferica in acciaio, costruita all'interno di un magazzino, misura un metro ed è piena di pistoni larghi una trentina di centimetri, ciascuno lungo quasi come Michel Laberge, fondatore e scienziato capo dell'azienda. Con il suo forte accento franco-canadese, Laberge descrive la macchina, il cui aspetto ricorda le atmosfere *steampunk*: «Il gas compresso accelera questi pistoni fino a 200 chilometri orari, e quindi colpiscono incudini... Bang!» grida, battendo le mani rumorosamente. «Tutti gli impatti devono avvenire entro cinque microsecondi per creare un'onda d'urto» che collassi esattamente al centro della camera.

Quando tutti i pezzi della macchina saranno integrati, spareranno una volta al secondo, come un cuore che batte. A ogni battito un anello fumoso di plasma, iniettato nella sfera, sarà compresso e provocherà una cascata di reazioni di fusione, breve ma ricca di energia. È più facile gestire la turbolenza con questo metodo a impulsi, sostiene Laberge, perché ogni ciambellina di plasma deve rimanere stabile solo per circa un millisecondo.

Laberge afferma che il sistema di iniezione ha già prodotto plasmi con la giusta densità di preimplosione, oltre a temperatura e forza del campo magnetico necessarie. I plasmi però sono durati solo 20 microsecondi, 50 volte meno del dovuto, prima di soccombere all'instabilità. Laberge crede che un nuovo design degli ugelli, con una forma più simile alla campana di una tromba, piegherà il campo magnetico creato dal plasma stesso fino alla misura perfetta per tenere insieme il combustibile abbastanza a lungo da permetterne la fusione.

Eppure «molti addetti ai lavori dicono che l'approccio di General Fusion non funzionerà mai», osserva Brennan, che collabora con l'azienda. I critici dubitano che un piccolo gruppo in una start-up possa risolvere i problemi del plasma che provocano frustrazioni ai ricercatori accademici da anni. «Ma scientificamente qualcosa ci dice che non lo possano fare?», chiede Brennan. «No».

In New Mexico, ai Sandia, gli esperimenti con la tecnica MagLIF hanno raggiunto ciò che le start-up non sono ancora riuscite a fare: una fusione su scala apprezzabile. Come la NIF, MagLIF punta ad alte densità di ioni – circa 10^{24} ioni per centimetro cubo – e tempi di confinamento dell'energia pari a qualche nanosecondo. Ma il sistema dei Sandia, con i suoi 34 metri di lunghezza, è più piccolo ed economico rispetto alla NIF, perché usa una soluzione in due tempi per riscaldare e pressurizzare il combustibile chiuso in un cilindro non più grande di una gomma di una matita.

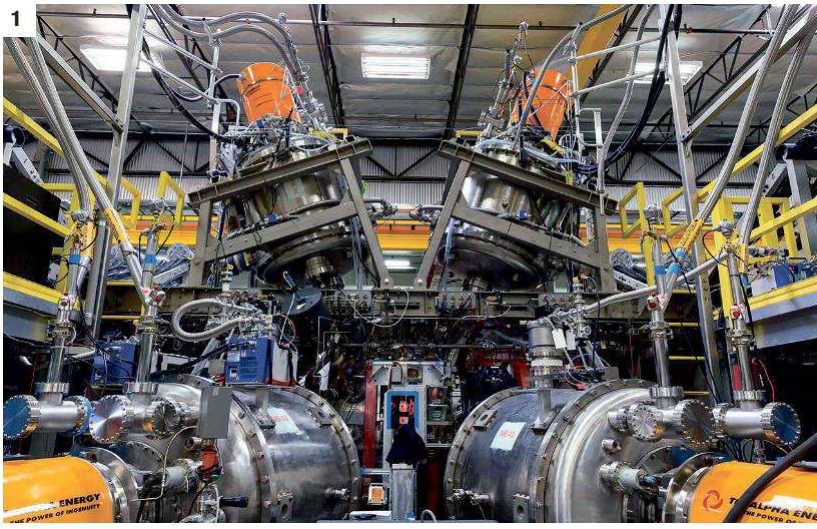
La cosiddetta Z machine che alimenta la MagLIF provoca una scarica elettrica da 19 milioni di ampere che esercita una potente presa magnetica e frantuma il cilindro. Un breve raggio laser da migliaia di miliardi di watt ionizza il combustibile mentre comincia a implodere. La macchina applica un campo magnetico separato per evitare che il plasma risultante esca dalle estremità del cilindro. Ma il cilindro che collassa può diventare instabile, permettendo al combustibile di uscire dai lati.

L'entità della fusione ottenuta in ogni sparo della MagLIF è aumentata di 100 volte dall'inizio dei test verso la fine del 2013. «MagLIF funziona già molto bene», spiega Hsu. Daniel Sinars, capo del progetto, prevede risultati ancora migliori da test ulteriori.

Se tutto va bene, il gruppo prevede di aumentare la scarica elettrica fino a 25 milioni di ampere. Così si dovrebbero generare circa 10^{16} reazioni di fusione, sufficienti a compensare l'energia assorbita dal combustibile per arrivare a fondersi, e questo uguaglierebbe – ma con una spesa assai minore – il risultato ottenuto dalla NIF nel 2014. «Sarebbe entusiasmante», commenta Sinars.

I Sandia hanno già programmato l'aggiornamento della Z machine. Con 60 milioni di ampere e l'aggiunta di trizio al combustibile di deuterio usato finora, la nuova Z800 potrebbe generare fino a 100.000 volte più energia per ogni sparo. Basterà per raggiungere l'ignizione e quindi la fusione autosufficiente almeno un decennio prima di ITER? Secondo i ricercatori dei Sandia, forse sì.

Dato che i laboratori Sandia sono pubblici, qualsiasi rinnovamento consistente dovrebbe essere approvato dal Congresso, che non è in vena di spese. Ma questa opinione potrebbe cambiare a causa della concorrenza. Secondo Slutz, scienziati cinesi hanno già costruito una versione più piccola della Z machine e stanno replicando gli esperimenti dei Sandia, mentre in Russia si prevede di realizzare una macchina simile da 50 milioni di ampere.



Gli iniettori (*in giallo e argento*) di Tri Alpha (*1*) sparano fasci atomici che farebbero ruotare un plasma di fusione caldo per mantenerlo stabile nel nucleo di un reattore. La Z machine dei Sandia (*2*) genera brevi impulsi di corrente intensa, che creerebbero forti campi magnetici per comprimere il combustibile della fusione.

Riscaldamento acceso

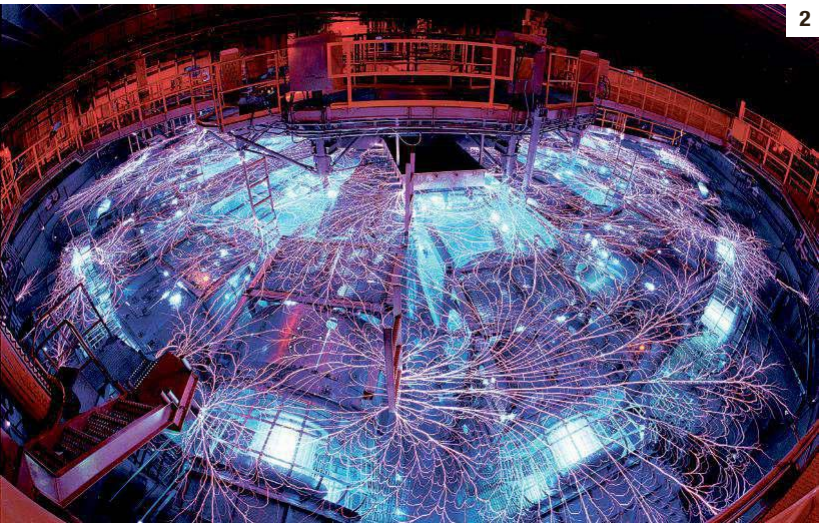
Se qualcuno di questi progetti di fusione riesce a raggiungere densità di ioni e tempo di confinamento necessari, deve ancora fornire il terzo ingrediente che serve per l'ignizione: una temperatura del plasma incredibilmente alta. Ed è difficile, perché emissioni di luce, interazioni tra gli elettroni e innumerevoli altri meccanismi possono raffreddare il plasma abbastanza da stroncare sul nascere le reazioni di fusione.

Ai Sandia, per esempio, Sinars e Slutz continuano a chiedersi perché il laser abbia scaldato il combustibile assai meno di quanto previsto dai loro modelli. Forse la finestra sottile che copre l'estremità aperta del bersaglio con il combustibile diffonde la luce. Ma può darsi che per questo lavoro un laser sia lo strumento sbagliato. Per un sistema commerciale, ammette Sinars, «probabilmente si cercherebbe di scaldare il combustibile in qualche altro modo». Il gruppo cerca di migliorare il riscaldamento con il laser, ma se non ci riuscirà il fallimento almeno arriverà presto.

Tri Alpha deve raggiungere una temperatura molto più alta rispetto alla concorrenza perché usa come combustibile una miscela di protoni e boro-11, che brucia a 3,5 miliardi di gradi. Una temperatura oltre 20 volte più grande di quella necessaria per il combustibile di deuterio e trizio.

I plasmi più caldi tendono a essere più difficili da contenere, ma Binderbauer scommette che a Tri Alpha invece il confinamento dell'energia migliorerà con l'aumento della temperatura. Finora nei test è stato così, ma addirittura la nuova macchina C-2W riscalderà i plasmi ad assai meno dell'1 per cento della temperatura necessaria, che manterrà per soli 30 millisecondi. Binderbauer ammette che potrebbe perdere questa scommessa sulla fisica, ma di-

Cortesia Tri Alpha Energy, Inc.



2

ce: «Non abbiamo dati in questo regime. È tutto da dimostrare». Anche General Fusion deve affrontare fattori fisici sconosciuti, per esempio la velocità con cui il calore è disperso dal plasma. «Non si può calcolare in base ai principi fondamentali, quindi ci sono molte possibilità di avere una brutta sorpresa... o una bella», spiega Laberge. «Se le perdite di calore sono peggiori del previsto, possiamo ingrandire la macchina. Ma se cresce fino a diventare come ITER, allora c'è un problema».

Dal prototipo alla centrale elettrica

Si stapperà lo champagne quando qualche reattore riuscirà a raggiungere l'ignizione, e quindi una maratona di duro lavoro ingegneristico comincerà a trasformare un reattore sperimentale in una centrale elettrica che genera energia e profitti. Per avere un impatto rilevante sulla fornitura elettrica globale, di cui si prevede una crescita del 70 per cento entro il 2040, la fusione dovrà avere costi competitivi rispetto alle altre fonti di energia pulita.

I tokamak giganteschi come ITER probabilmente non si affermeranno mai, dice Dennis Whyte, che dirige il Plasma Science and Fusion Center al Massachusetts Institute of Technology, perché per funzionare consumano troppa della loro stessa energia. Le start-up hanno dedicato da subito più attenzione all'aspetto ingegneristico, ma dovranno ancora affrontare tante sfide pratiche.

Nel prossimo futuro, per esempio, ai Sandia ogni sparo con MagLIF distruggerà parte dell'apparecchiatura. La fusione con deuterio e trizio libera gran parte di energia sotto forma di neutroni ad alta velocità, che danneggiano i componenti in acciaio e via via li rendono radioattivi. Qualsiasi centrale a fusione che usi questo tipo di combustibile dovrà catturare i neutroni veloci e usarne il calore per far girare turbine con cui generare elettricità, al tempo stesso riducendo al minimo gli effetti collaterali. Ai Sandia gli scienziati non si sono ancora soffermati sulla prevenzione dei danni e hanno solo qualche idea, approssimativa e non verificata, su come aumentare gli spari ed eseguirne vari ogni minuto, invece che ogni settimana. HyperV e Magneto-Inertial Fusion Technologies, azienda di Tustin, in California, usano finanziamenti dell'ARPA-E per esplorare approcci simili che potrebbero risolvere alcune di queste difficoltà, ma devono fare ancora molta strada.

Tri Alpha punta alla fusione di protoni e boro proprio per evitare gli ostacoli posti dai neutroni veloci. La fusione con questo combustibile emette tre nuclei di elio, detti particelle alfa – da cui il nome dell'azienda – e raggi X, ma pochissimi neutroni. Il lato negativo è che i raggi X forniscono oltre l'80 per cento dell'energia prodotta.

In linea di principio, spiega Binderbauer, celle fotovoltaiche disposte all'interno del contenitore potrebbero convertire questi fotoni in elettricità. Ma questa tecnologia non esiste ancora. Così l'azienda esamina l'idea di ricoprire con un refrigerante le pareti interne della camera di fusione per estrarre il calore depositato dai raggi X.

General Fusion continua con il combustibile di deuterio e trizio, nonostante il problema dei neutroni e il fatto che il trizio sia leggermente radioattivo, assai raro e molto costoso. Laberge prevede di pompare un vortice turbinoso di piombo fuso e litio lungo le pareti interne della camera di reazione per catturare l'energia dei neutroni. I neutroni scinderanno inoltre alcuni atomi di litio in elio e trizio, che quindi si potranno riciclare come combustibile.

Sulla carta è una soluzione elegante, ma un sistema simile non è mai stato costruito. La quantità di trizio che sarebbe generata, spiega Hsu, è ipotetica. E Laberge teme che mentre le onde d'urto in arrivo dai pistoni passano nella miscela di piombo e litio, parte del metallo possa schizzare nel plasma, spegnendo la fusione: «Sarebbe come versare acqua sul fuoco».

Le strade meno battute

Dato il ritmo deludente di ITER e NIF, spiega Whyte, «è arrivato il momento di raccogliere tutte le conoscenze ottenute e guardare ad altri sistemi di ottimizzazione», compresi interventi sui tokamak per renderli più piccoli o piegarli in strane forme, i cosiddetti *stellarator*. «Mi piacerebbe vedere una gara tra un tokamak compatto, l'idea di General Fusion, uno stellarator compatto e una macchina come quella di Tri Alpha. Vediamo quale funziona meglio».

Attualmente negli Stati Uniti quella gara si basa sulla generosità degli investitori. I finanziamenti federali per le strade alternative verso la fusione diminuiscono di anno in anno, osserva Hsu. Insieme con Stewart Prager, capo del laboratorio di fisica dei plasmi alla Princeton University, ha chiesto al Congresso di aumentare i fondi alla ricerca per esplorare metodi di fusione innovativi, che potrebbero permettere ad altre start-up ambiziose di entrare in gioco. Se qualcuna delle concezioni innovative ha successo, continua Hsu, «l'energia da fusione si potrebbe forse sviluppare con pochi miliardi di dollari in meno di vent'anni».

Forse, o forse no. Come osserva Binderbauer, «ci sono buone possibilità che la fisica a noi ancora sconosciuta ci faccia qualche brutto scherzo».

Ma pensiamo al premio potenziale: una fonte di energia che non dipende dai capricci del vento o del Sole coperto dalle nuvole, non richiede grandi cambiamenti alla rete elettrica esistente, non pone il problema delle armi nucleari, non rischia il *meltdown* o l'irradiazione delle comunità circostanti e forse, una volta avviata, non sarebbe più costosa di altre forme di energia pulita.

Vale la pena di fare qualche altro tentativo? ■

PER APPROFONDIRE

Plasma Physics: The Fusion Upstarts. Mitchell Waldrop M., in «Nature», Vol. 511, pp. 398-400, 24 luglio 2014.

Scaling Magnetized Liner Inertial Fusion on Z and Future Pulsed-Power Accelerators. Slutz S.A. e altri, in «Physics of Plasmas», Vol. 23, n. 2, articolo n. 022702, febbraio 2016.

La falsa partenza della fusione. Moyer M., in «Le Scienze» n. 502, maggio 2010.

Cortesia Randy Montoya/Sandia National Laboratories

2016 IDEE CHE CAMBIANO IL MONDO

10 grandi progressi

con le potenzialità per risolvere problemi
e migliorare la vita di tutti noi

L'espressione «cambiare il mondo» è usata fin troppo spesso. Eppure, come si potrebbe definire altrimenti l'influenza sulla storia mondiale di invenzioni come il transistor, il World Wide Web o il telefono cellulare? Alcune idee danno davvero una svolta alla storia. È ancora presto per sapere se le batterie che respirano carbonio, i robot ingeribili, i satelliti quantistici e le altre sette idee descritte in queste pagine avranno un impatto simile. Molti progetti falliscono, e le idee più grandi in genere portano con sé rischi altrettanto grandi. Ma anche le idee ridicole possono diventare presto inevitabili. E naturalmente alcune di loro finiscono con il trasformare il mondo.

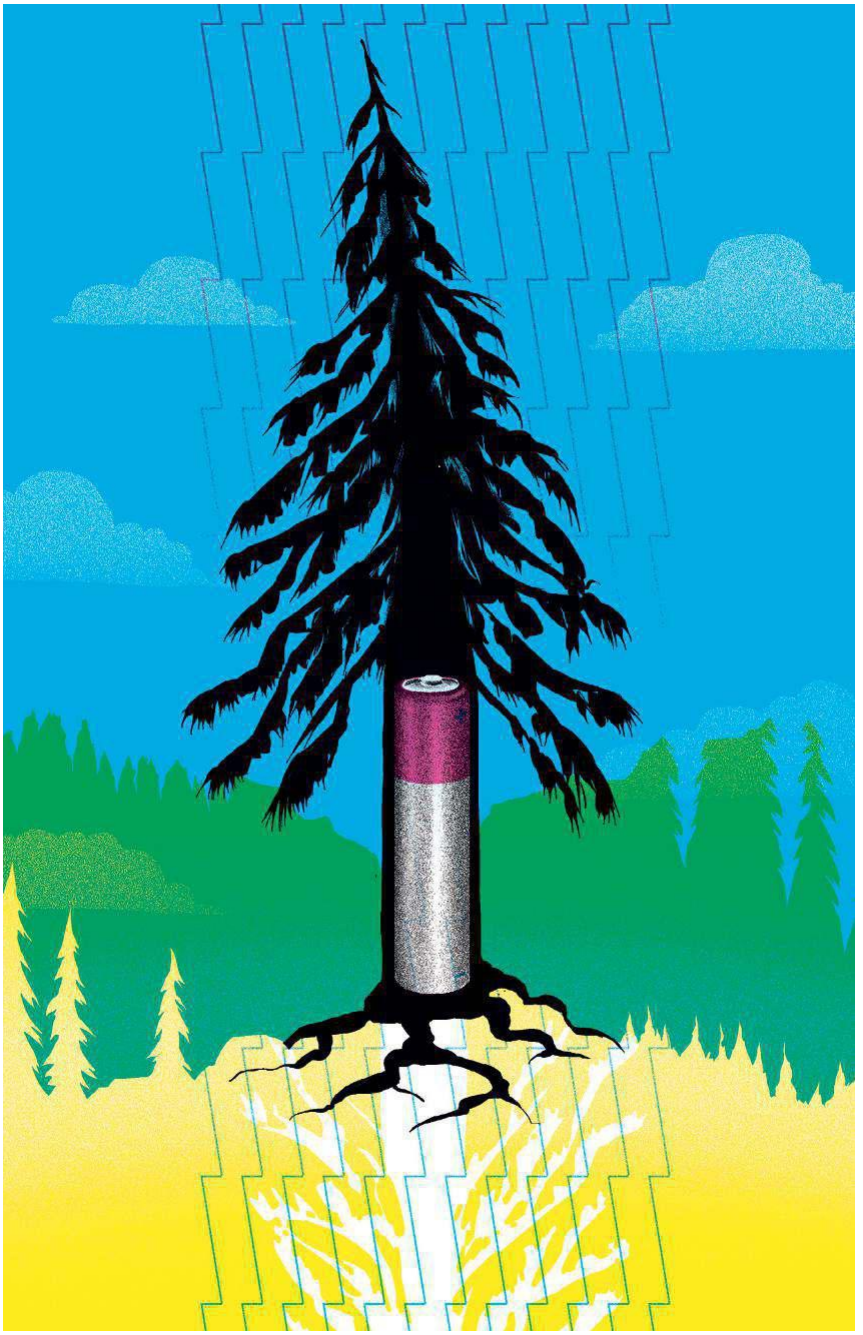
La redazione

Illustrazioni di Daniel Stolle

1

Batterie che respirano carbonio

Celle elettrochimiche potrebbero risucchiare il carbonio dall'atmosfera e trasformarlo in elettricità



Per fermare il riscaldamento globale non basta ridurre le emissioni di gas serra. A questo punto dovremo eliminare parte dell'anidride carbonica che si trova già in atmosfera. La buona notizia: ci sono molti modi per farlo. Quella cattiva: in genere questi metodi richiedono enormi quantità di energia. La tecnologia ideale per sequestrare il carbonio genererebbe energia, anziché consumarla. In uno studio pubblicato a luglio su «Science Advances», Wajdi Al Sadat e Lynden Archer, entrambi ricercatori alla Cornell University, hanno descritto il progetto di una cella elettrochimica che cattura anidride carbonica.

L'anodo della batteria è composto di alluminio, che è economico, abbondante e facile da lavorare. Il catodo è realizzato in carbonio poroso, in cui i ricercatori iniettano un composto di ossigeno gassoso e anidride carbonica. All'interno della batteria, alluminio, ossigeno e anidride carbonica reagiscono, fornendo elettricità e ossalato di alluminio. Sadat e Archer sostengono che, durante il ciclo vitale della batteria da 1,4 volt, la cella immagazzina un chilogrammo di anidride carbonica per ogni chilogrammo di alluminio usato.

Inoltre è emerso che il sottoprodotto chimico in cui finisce il carbonio – l'ossalato di alluminio – si dimostra prezioso. La domanda globale di ossalati, che si usano come detergenti e candeggianti, è intorno alle 230.000 tonnellate all'anno, e ogni tonnellata generata come sottoprodotto dalle batterie non ha bisogno di essere prodotta da una fabbrica che emette carbonio. Calcolando tutti i risparmi di carbonio, le batterie catturano 3,52 chilogrammi di CO_2 per ogni chilogrammo di alluminio usato per produrle. «Se si considerano le enormi quantità di CO_2 coinvolte, queste batterie convengono», spiega Archer.

La tecnologia ideale per catturare il carbonio genererebbe energia invece di consumarla

Archer sostiene che lui e i suoi colleghi sono ancora lontani dall'obiettivo di trasformare il progetto in una tecnologia utilizzabile. Innanzitutto devono dimostrare che è redditizia e applicabile su larga scala. Se ci riusciranno, Archer immagina che un giorno le centrali elettriche o i tubi di scarico dei veicoli saranno equipaggiati con queste batterie. «Così la CO_2 non verrà solo eliminata», spiega. «Verrà usata».

Annie Sneed

2

Nuovi antibiotici partendo da zero

Un metodo per progettare composti innovativi potrebbe aiutare a sconfiggere i batteri resistenti ai farmaci

È difficile immaginare un mondo senza antibiotici, ma visto l'uso eccessivo di questi farmaci stiamo andando proprio in questa direzione. Secondo i Centers for Disease Control and Prevention, solo negli Stati Uniti muoiono oltre 23.000 persone all'anno per infezioni che gli antibiotici non sono più in grado di curare. Uno studio commissionato dal governo britannico ha valutato che entro il 2050 la resistenza agli antibiotici provocherà 10 milioni di morti all'anno in tutto il mondo.

Gli scienziati sono impegnati da tempo nello sviluppo di nuovi farmaci in grado di uccidere questi superbatteri. Un esempio è la grande classe di antibiotici detti macrolidi, che curano le infezioni batteriche comuni, tra cui polmonite, tonsillite da streptococco, infezioni alle orecchie e alle pelle, e malattie a trasmissione sessuale.

Da tempo i ricercatori stanno tentando di migliorare le caratteristiche chimiche di questi antibiotici per renderli più efficaci contro i ceppi resistenti, ma finora non hanno avuto molto successo. La struttura chimica dei macrolidi è difficile da manipolare e le materie prime usate per realizzarli sono prodotte in grandi vasche di batteri industriali, con un processo che non è facile perfezionare con precisione. «I chimici hanno le mani legate da decenni», commenta Andrew Myers, professore di chimica e biologia chimica alla Harvard University.

Di recente, però, Myers e il suo gruppo hanno ideato un modo per creare i macrolidi partendo da zero. A questo scopo, ne scompongono la struttura in otto blocchi semplici e quindi li ricostruiscono con forme diverse, perfezionandone via via la struttura chimica. In un articolo di ricerca pubblicato lo scorso maggio su «Nature», il gruppo di Myers ha riferito la sintesi di oltre 300 composti innovativi. Testati con 14 batteri patogeni, la maggior parte di quei composti ha tenuto alla larga i microbi, e molti hanno sconfitto i ceppi resistenti ai farmaci.

Da allora i ricercatori hanno realizzato altri 300 nuovi composti, e Myers ha fondato un'azienda, Macrolide Pharmaceuticals, per mettere in commercio i farmaci prodotti con questo processo. Il gruppo di Myers ha cominciato a lavorare su altre due classi di antibiotici, chiamate rispettivamente lincosamidi e amminoglicosidi. Solo pochi dei composti da ottenuti da Myers e collaboratori diventeranno antibiotici con un uso pratico, e anche questi dovranno aspettare a lungo per poter arrivare sul mercato. Myers spera tuttavia che le ricerche come la sua aiutino a sconfiggere i superbatteri: «Sono assolutamente convinto – dice – che continuando su questa strada faremo ulteriori progressi».

A.S.

3

Satelliti quantistici

La trasmissione satellitare di chiavi crittografiche quantistiche potrebbe rendere impossibile hackerare Internet

Una crittografia assolutamente sicura non richiede una tecnologia più avanzata di una matita e un pezzo di carta: scegliete una sequenza casuale di lettere e numeri che funga da chiave di un messaggio cifrato. Scrivete la chiave sulla carta, usatela una volta e quindi bruciatela. Il trucco consiste nel fare in modo che nessuno intercetti o manometta la chiave, ma è proprio quello che su Internet succede continuamente.

La distribuzione a chiave quantistica (o QKD, da Quantum Key Distribution) risolve questo problema generando una chiave monouso con fotoni *entangled*, cioè particelle di luce i cui stati quantistici sono collegati tra loro. Qualsiasi intervento su una particella si riflette istantaneamente sull'altra, a qualunque distanza si trovino. Il problema della QKD è che nessuno ha capito come si possano trasmettere fotoni entangled su grandi distanze. Lo scorso agosto però l'Accademia cinese delle scienze ha fatto un passo da gigante verso la soluzione di questo problema, portando in orbita il primo satellite quantistico del mondo.

Il programma, detto Quantum Experiments at Space Scale (QUESS), nasce dalla collaborazione con l'Accademia austriaca delle scienze. L'idea consiste nell'usare il satellite per trasmettere chiavi quantistiche a due osservatori da una parte e dall'altra della Cina, distanti circa 1200 chilometri, oltre otto volte più del record di distanza attuale.

Secondo Anton Zeilinger, fisico dell'Università di Vienna e membro del comitato scientifico di «Scientific American», il cui gruppo ha stabilito quel record nel 2012 (e che attualmente sta collaborando con il suo ex studente Jian-Wei Pan, oggi scienziato capo del QUESS), una piattaforma nello spazio era l'unica possibilità: «Ditemi – commenta – in quale luogo sulla Terra c'è una visibilità di 1000 chilometri».

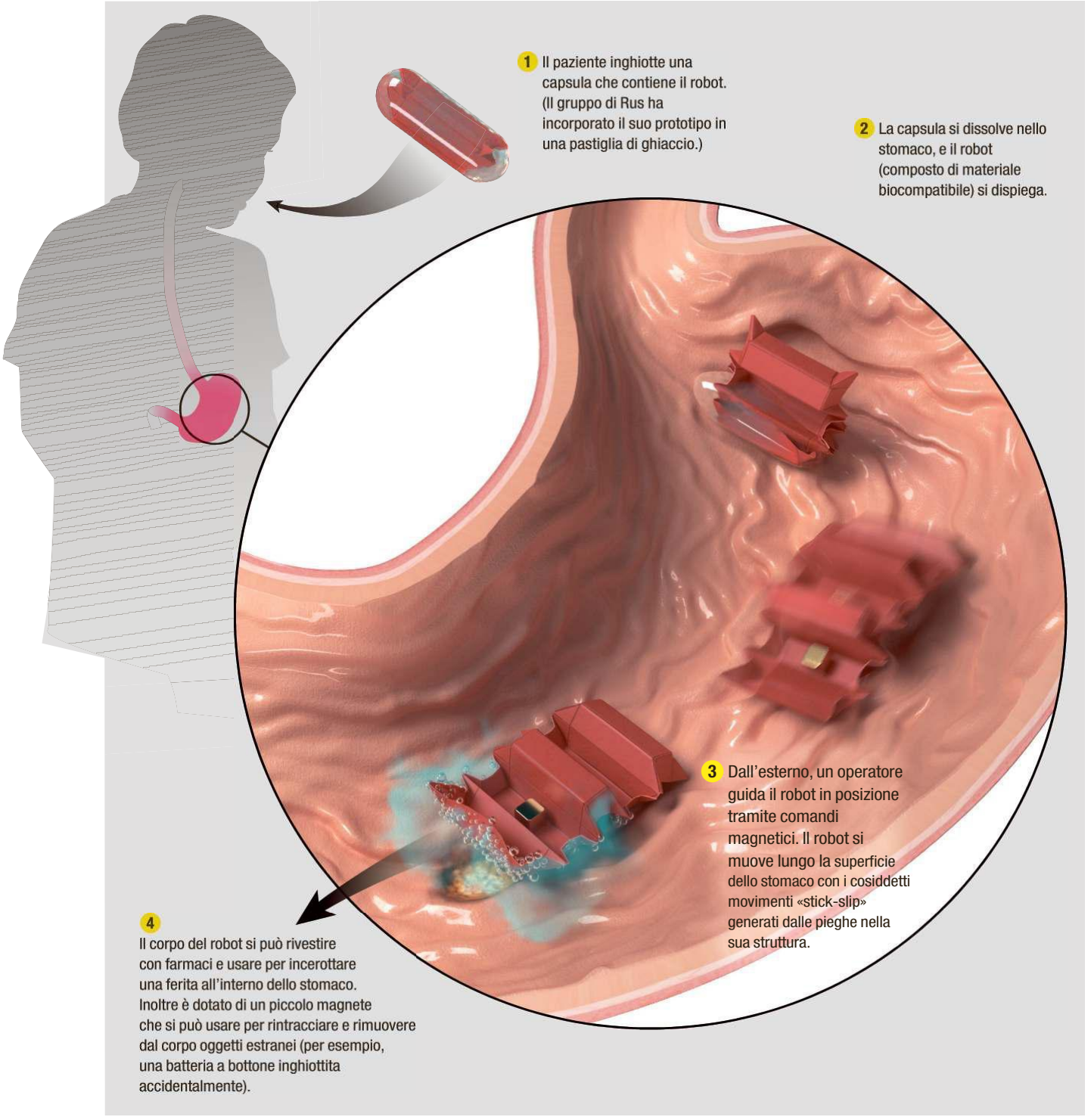
Se i ricercatori cinesi stabiliscono un nuovo record di distanza, in futuro i satelliti potrebbero diventare la piattaforma orbitante per un'«Internet quantistica» non hackerabile, in cui i pacchetti di dati criptati avrebbero una sicurezza garantita dalle leggi della fisica. «Speriamo di realizzare una comunicazione quantistica intercontinentale», spiega Zeilinger. «Non è solo un'idea fantascientifica: è il modo in cui i computer si parleranno in futuro».

John Pavlus

4

Microrobot ingeribili

Robot telecomandati con una struttura a origami possono eseguire procedure mediche dall'interno



Il robot può portare un farmaco su una ferita interna o medicarla, coprendola come un cerotto

Illustrazione di AXS Biomedical Animation Studio; fonte: *Ingestible, Controllable, and Degradable Origami Robot for Patching Stomach Wounds*, di Shuhei Miyashita e altri. Presentato alla conferenza internazionale IEEE 2016 su robotica e automazione, Stoccolma, Svezia, 16-21 maggio 2016

Sembra che un intervento chirurgico sia tanto più avanzato quanto meno è invasivo. La chirurgia bariatrica, per esempio, una volta implicava l'apertura dell'addome del paziente dall'ombelico al diaframma; adesso queste operazioni avvengono in laparoscopia, con incisioni di pochi centimetri. Oggi ricercatori del Massachusetts Institute of Technology hanno costruito il prototipo di un robot in grado di eseguire procedure semplici nello stomaco, senza alcuna incisione o cavo collegato con l'esterno: il paziente non fa che ingoiarlo.

Nell'apparato digerente il microrobot, chiuso in una pastiglia di ghiaccio, si fa strada fino allo stomaco. Il ghiaccio si scioglie e il robot si dispiega come un origami. Da aperto ha l'aspetto di un foglio di carta raggrinzito e si muove grazie a pieghe, fessure e alette di materiali, situati in posizioni strategiche, che si espandono o restringono quando sono sottoposti al calore o a campi magnetici; questi punti di movimento funzionano come articolazioni e muscoli. I chirurghi pilotano il robot dall'esterno, tramite campi magnetici che agiscono su una calamita a bordo del robot. Questo inoltre può strisciare fino alla posizione desiderata flettendo le pieghe contro le pareti gastriche, con un movimento *stick-slip*.

Il corpo biocompatibile del robot – prodotto parzialmente con l'intestino di maiale usato per le salsicce – può applicare farmaci su una ferita interna o medicarla, coprendola come un cerotto. Inoltre il robot può usare il suo magnete per rimuovere un corpo estraneo, per esempio una batteria a bottone inghiottita. Questo sistema deve ancora essere testato sugli esseri umani o su animali vivi.

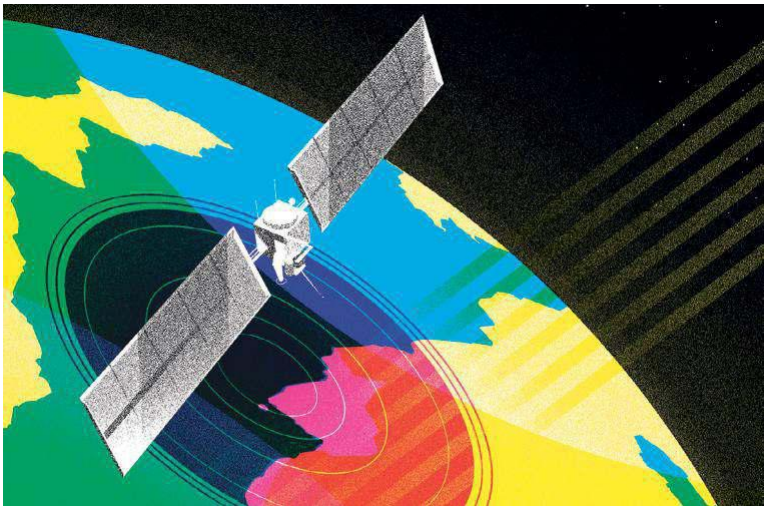
Ma Daniela Rus, ingegnere robotico del Massachusetts Institute of Technology il cui gruppo ha effettuato la ricerca, lo considera la dimostrazione teorica della possibilità di «robot ancora più efficaci» che in futuro potrebbero usare sensori di bordo per diagnosticare la fonte di un'emorragia interna. Asportare oggetti senza operazioni traumatiche sarebbe un progresso enorme. «Negli anni settanta mio padre ha avuto un calcolo renale, e per estrarglielo hanno aperto praticamente metà del suo corpo», spiega Rus. «Ci vorranno un po' di anni prima che i microrobot diventino una realtà, ma se ci riusciranno, immaginate che interventi si potrebbero fare con questo metodo».

J. P.

5

Software in grado di prevedere la povertà

Un programma di apprendimento automatico analizza le immagini satellitari per trovare le aree sperdute che hanno bisogno di aiuto

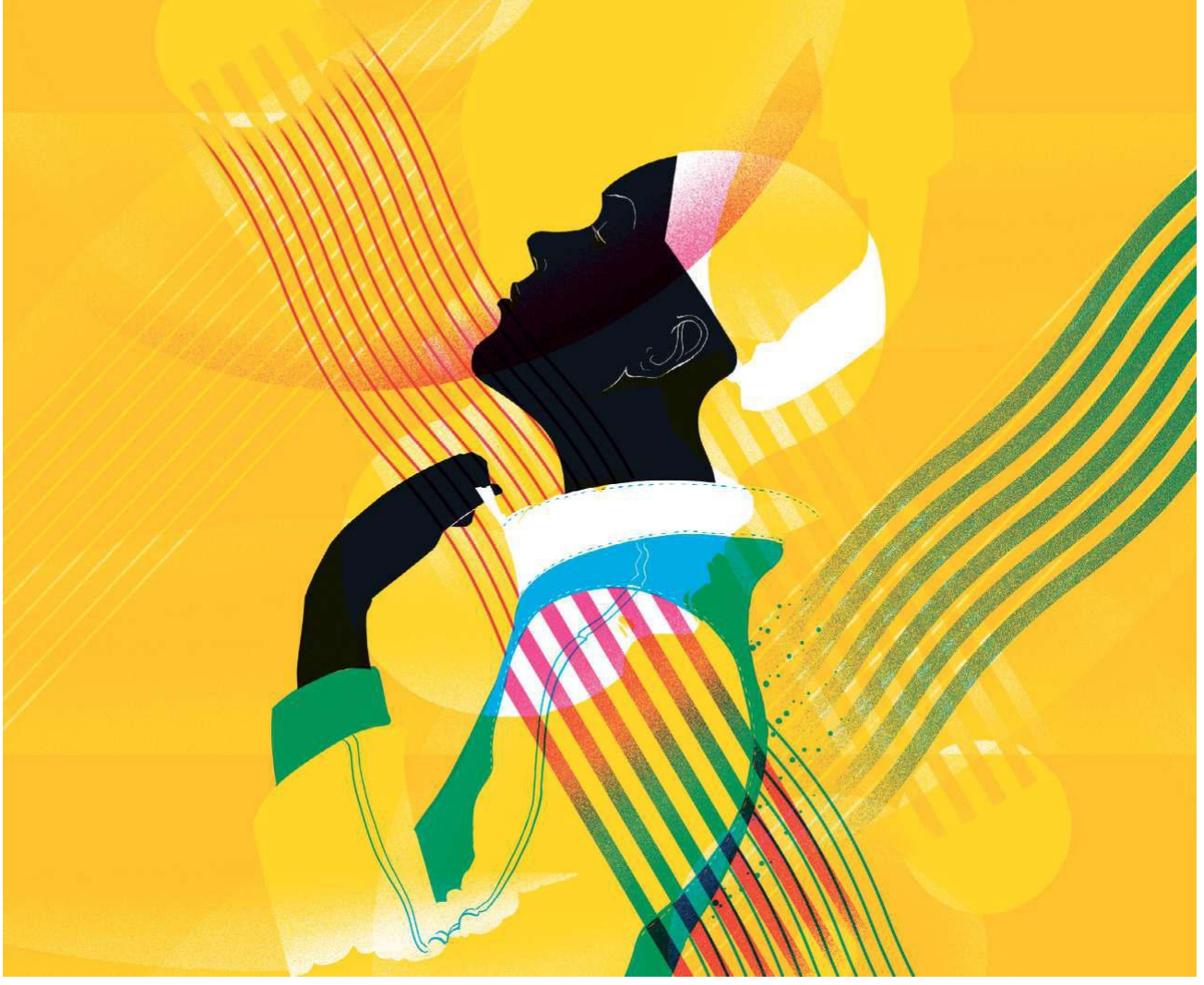


L'anno scorso le Nazioni Unite hanno stabilito l'obiettivo di eliminare la povertà estrema in tutto il mondo entro il 2030. È un traguardo ambizioso. Il primo passo – scoprire dove vivono le persone più povere – si è dimostrato più difficile del previsto. Fare sondaggi economici in zone povere o a rischio di guerra può essere costoso e pericoloso. Da tempo i ricercatori tentano di aggirare questo limite cercando aree stranamente buie nelle immagini satellitari notturne. «In genere i luoghi illuminati di notte sono più ricchi», spiega Marshall Burke, *assistant professor* di scienze del sistema Terra alla Stanford University. Ma questo metodo è imperfetto, soprattutto se si tratta di distinguere le gradazioni di povertà. Dallo spazio, di notte, la povertà moderata e quella estrema hanno lo stesso aspetto: buio.

Burke e il suo gruppo ritengono di avere scoperto un modo per migliorare lo studio delle immagini satellitari tramite l'apprendimento automatico. I ricercatori hanno addestrato un programma di analisi delle immagini, sottoponendogli quelle diurne e notturne di cinque paesi africani. Combinando i due set di dati, il computer ha «imparato» quali caratteristiche diurne (strade, aree urbane, terreni agricoli) erano collegate a livelli diversi di luminosità delle luci notturne. «Le luci notturne sono un modo per capire che cosa è importante nelle immagini diurne», spiega Burke.

Una volta completato l'addestramento, il programma di Burke è riuscito a individuare le aree più povere solo guardando le immagini satellitari diurne. Quando i ricercatori hanno confrontato i risultati con i dati di sondaggi eseguiti nei cinque paesi africani, hanno rilevato che il loro metodo si è dimostrato più efficace rispetto ad altri sistemi non tradizionali di previsione della povertà, tra cui il modello basato sulle luci notturne. Governi e organizzazioni no profit potrebbero usare questo strumento, per esempio, per determinare chi dovrebbe beneficiare dei programmi di trasferimento di denaro, o per valutare come funziona una certa politica antipovertà. I ricercatori hanno già cominciato a collaborare con Banca Mondiale e U.S. Agency for International Development per classificare la povertà in paesi come la Somalia. Per Burke e il suo gruppo la prossima tappa sarà usare la loro nuova tecnica per creare una mappa di tutta l'Africa.

A.S.



6

Abiti freschi

Un tessuto nano-poroso rinfrescherebbe la persona che lo indossa, riducendo l'esigenza di aria condizionata

Più il mondo si riscalda, più si accendono i condizionatori. Ma raffreddare l'aria richiede energia, che provoca emissioni di gas serra. Negli Stati Uniti, ogni anno i condizionatori emettono in atmosfera in media 100 milioni di tonnellate di anidride carbonica. Yi Cui, professore di scienza dei materiali e ingegneria alla Stanford University, vuole invece che ci si rinfreschi con l'abbigliamento. Anche gli abiti leggeri in cotone assorbono la radiazione infrarossa emessa dal nostro corpo, trattenendo il calore. Cui e il suo gruppo hanno scoperto che un materiale chiamato polietilene nanoporoso, o nanoPE, usato nelle batterie agli ioni litio, lascia fuggire quella radiazione. E diversamente dall'abbigliamento sportivo *high-tech*, che dipende dalla sudorazione per mantenersi freschi, il nanoPE funziona senza necessità di sudorazione.

Il nanoPE, che ha circa lo stesso prezzo del tessuto di cotone, si presenta in fogli sottili, con pori di larghezza tra 50 e 1000 nanometri. I pori così piccoli lasciano fuggire la radiazione infrarossa mentre diffondono la luce visibile, rendendo opaco il materiale. (Il normale polietilene è trasparente: un ovvio difetto per una fibra tessile.) Un foglio di nanoPE sembra un sottile pezzo di plastica, non certo il materiale ideale per l'abbigliamento. Il gruppo di Cui l'ha trasformato in un tessuto accettabile rivestendolo con una sostanza chimica che fa uscire l'acqua, chiudendo uno strato di cotone tra due fogli di nanoPE e praticando minuscoli fori nel tessuto con un microago, in modo da facilitare il passaggio dell'aria.
In seguito a queste migliorie, Cui ha scoperto che il nanoPE raffreddava la pelle umana sintetica di due gradi in più rispetto al cotone. Il gruppo ha illustrato le sue scoperte in un articolo pubblicato a settembre su «Science». «Se si indossa il nanoPE e la temperatura esterna è leggermente più bassa di quella corporea, ci si sente più freschi», spiega Cui. In giornate calde forse si vorrà comunque usare l'aria condizionata, ma si potrà regolare il termostato su un livello più alto, e le ricerche dimostrano che alzare solo di pochi gradi la temperatura preimpostata può quasi dimezzare l'energia consumata.
Il gruppo deve ancora testare durata, comfort ed effetto rinfrescante del nanoPE sulla pelle umana vera, e i ricercatori devono ancora stabilire come le tinture ne modificheranno le prestazioni. Se il materiale supererà queste prove, Cui immagina che comincerà a essere usato nelle uniformi e negli indumenti di chi lavora in fabbriche e ospedali.

A.S.

7

L'antivirale perfetto

Una rara mutazione genetica potrebbe ispirare una pillola in grado di debellare qualsiasi virus

Una famigerata caratteristica dei virus è che sfuggono ai farmaci, ma sono impotenti contro una rara mutazione del gene *ISG15*. I portatori di questa mutazione combattono meglio gran parte dei virus che affliggono l'umanità, ma probabilmente ne è dotata meno di una persona su 10 milioni.

Dusan Bogunovic, della Icahn School of Medicine at Mount Sinai, pensa sia possibile sviluppare un farmaco che imiti questa mutazione. Se ha ragione, potrebbe essere vicino allo sviluppo di una pillola che conferirebbe temporaneamente la capacità di combattere un virus qualsiasi, senza ammalarsi. Questo farmaco inoltre dovrebbe conferire l'immunità a vita nei confronti di qualsiasi virus incontrato durante l'assunzione del farmaco stesso (a meno che il virus muti, come l'influenza). Per capire come la mutazione sopprime i virus e come un farmaco potrebbe imitarla, Bogunovic e il suo gruppo hanno effettuato esperimenti sulle cellule di sei persone con questa caratteristica, ne hanno sequenziato il genoma e isolato cellule ematiche e cutanee. Quando i ricercatori le hanno esposte a svariati virus, tra cui Zika, influenza e herpes, dopo 24 ore queste cellule mostravano un numero di copie delle particelle virali inferiore di vari ordini di grandezza rispetto alle cellule normali.

Il motivo, come spiegato a maggio su «Nature Communications», è che la mutazione *ISG15* disattiva una funzione che contribuisce a regolare l'infiammazione. Quest'ultima aiuta il corpo a combattere i virus, quindi queste persone «sono un po' più pronte delle altre ad affrontare il virus che le infetta», spiega Bogunovic. Il loro corpo combatte i virus e sviluppa l'immunità prima che possano replicarsi a sufficienza da farle ammalare.

Bogunovic vuole scoprire un farmaco che imiti la mutazione *ISG15*. «Perfezionando il nostro sistema, potremmo tenere a bada il primo attacco infettivo», spiega. Adesso il gruppo sta esaminando 16 milioni di composti, alla ricerca di un farmaco antivirale promettente. Quando troverà dei candidati, dovrà perfezionarne le caratteristiche chimiche, eseguire test tossicologici e sugli animali, per effettuare infine trial clinici sugli esseri umani.

Il successo è tutt'altro che sicuro. A volte alcune persone con la mutazione *ISG15* hanno crisi epilettiche e un principio di malattie autoimmuni simili al lupus; qualsiasi farmaco dovrebbe evitare questi effetti collaterali. Bogunovic però è ottimista, ed è in trattativa per fondare un'azienda basata sulle sue ricerche. «Niente è impossibile», commenta. «È una strada lunga, ma entusiasmante».

A.S.

8

Programma a lettura istantanea

Un approccio all'intelligenza artificiale permetterebbe ai computer di riconoscere schemi visivi meglio delle persone

Se qualcuno vi facesse vedere un carattere di un alfabeto sconosciuto e vi chiedesse di copiarlo, probabilmente ci riuscireste. Un computer invece sarebbe in difficoltà, anche se dotato dei più avanzati algoritmi di apprendimento profondo, come quelli usati da Google per catalogare le foto. Questi sistemi di apprendimento automatico includono un addestramento con enormi insiemi di dati per distinguere immagini, anche le più semplici. Può andare bene per le macchine che negli uffici postali smistano le lettere in base al CAP. Ma per problemi più complessi, come tradurre al volo da una lingua all'altra, un approccio imparato da una manciata di esempi sarebbe molto più efficiente.

I computer sono più vicini a questo progresso grazie a un sistema di apprendimento automatico detto BPL (*Bayesian Program Learning*, apprendimento bayesiano). Ricercatori dell'Università di New York, del Massachusetts Institute of Technology e dell'Università di Toronto hanno dimostrato che, usando il BPL, un computer può superare le persone nel riconoscere e ricreare set di caratteri ignoti scritti a mano, dopo avere visto un solo esempio. («Bayesiano» si riferisce a un ragionamento probabilistico che si può usare per aggiornare ipotesi incerte in base a nuove prove.)

Il BPL è diverso dall'apprendimento profondo, che imita in modo approssimativo le capacità del cervello di riconoscere schemi semplici; si ispira invece alla facoltà del cervello di dedurre una serie di azioni che potrebbero determinare un certo schema. Per esempio, riconoscere che la lettera A può essere formata da due tratti obliqui collegati in cima, con un tratto orizzontale in mezzo. «Il computer rappresenta la A assemblando un programma semplice che genera esempi della lettera, con diverse variazioni ogni volta che si esegue il codice», spiega Brenden Lake, dell'Università di New York, che ha collaborato allo studio. I processi bayesiani permettono al programma di affrontare l'incertezza del ricreare lettere sconosciute cominciando da parti più piccole già note (per esempio il tratto orizzontale in una A). Questo apprendimento è più versatile e più efficiente. I processi usati dal BPL per scomporre e ricreare una lettera sconosciuta potrebbero essere alla base delle applicazioni di intelligenza artificiale che deducono schemi di causa-effetto in fenomeni complessi (per esempio lo scorrimento di un fiume), e usarli per sistemi diversi. Gli esseri umani usano regolarmente questo tipo di «pensiero laterale» astratto; il BPL potrebbe attivare capacità analoghe per i computer. «Cerchiamo di far imparare ai computer concetti applicabili a molti compiti o settori diversi», spiega Lake. «È un aspetto fondamentale dell'intelligenza umana».

J.P.

9

Cartine diagnostiche a pochi centesimi

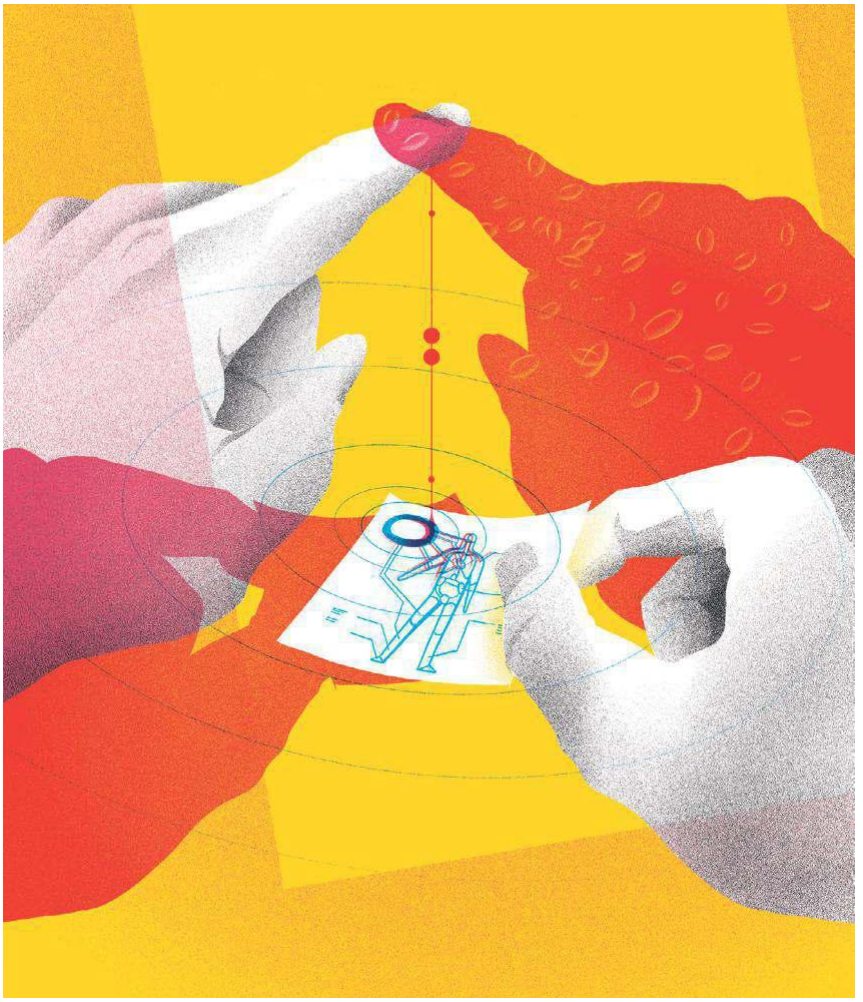
Uno screening rapido ed economico per malattie come Ebola e tubercolosi potrebbe salvare vite in zone sperdute e povere

In un ospedale rurale africano arriva un paziente con la febbre alta. La diagnosi potrebbe essere di tutto, da una leggera febbre tifoide a Ebola. Anche se i test di laboratorio sul sangue sono disponibili, ci vorranno giorni per avere i risultati. Che cosa deve fare un medico: prescrivere antibiotici oppure ordinare una quarantena?

Da una decina d'anni i ricercatori lavorano a diagnosi con cartina rapide ed economiche (basti pensare ai test di gravidanza fai-da-te), che in casi simili potrebbero salvare vite. La prima generazione di questi test sta arrivando a piccoli passi sul mercato. L'organizzazione no-profit Diagnostics For All sta aspettando l'approvazione di legge per lanciare in Africa un test ematico della funzionalità epatica. La Intellectual Ventures di Bellevue, nello Stato di Washington, finanziata dalla Bill&Melinda Gates Foundation, sta studiando un test della malaria ultrasensibile, oltre a uno strumento diagnostico per la tubercolosi che analizza l'urina. Paul Yager, professore di bioingegneria all'Università di Washington, sta sviluppando un test sensibile per individuare nel sangue la proteina del virus Ebola. Nessuno di questi sistemi costa più di qualche dollaro o richiede una formazione specifica.

Il cuore di questi strumenti diagnostici sono strisce di carta su cui sono incise o applicate forme che separano, concentrano e miscelano i fluidi. Per natura, la carta assorbe sangue, urina e altri fluidi, quindi i campioni scorrono negli strumenti spontaneamente. Le forme guidano il fluido attraverso le diluizioni e reazioni necessarie per identificare un agente patogeno o il marcatore di una malattia. Per esempio il test della funzionalità epatica di Diagnostics For All contiene un filtro in grado di trattenere i globuli rossi, permettendo al plasma di scorrere in uno strato di carta sottostante, carico di reagenti che si combinano con un enzima che indica i danni al fegato. Un cambiamento di colore rappresenta il livello enzimatico del paziente.

In generale la prima generazione di cartine diagnostiche rileverà le malattie individuando le molecole prodotte dal corpo infettato o dagli stessi microbi responsabili dell'infezione, ma in seguito potrebbero arrivare dei test in grado di rilevare direttamente il DNA dei patogeni. Questi cosiddetti test dell'acido nucleico permetterebbero ai medici di identificare con precisione le malattie nelle loro prime fasi. Yager, George Whitesides, professore di chimica della Harvard University, e altri ricercatori stanno lavorando singolarmente ai test dell'acido nucleico su carta. Yager sta sviluppando un test fai-da-te del virus Zika basato sull'acido nucleico e sta richiedendo finanziamenti per test più rapidi ed economici per Zika, dengue e febbre gialla.



Un medico deve ordinare antibiotici oppure una quarantena?

Restano alcune difficoltà tecniche, ma per i ricercatori l'ostacolo più grande è quello finanziario. Le case farmaceutiche non vedono molti guadagni in strumenti del costo di qualche centesimo, quindi gran parte dei finanziamenti proviene da governi e fondazioni private. «Noi e altri abbiamo dimostrato che questa tecnologia funziona», spiega Whitesides. «Molto dipende dal fatto che si riesca o meno a superare l'ultimo ostacolo della messa in commercio».

Prachi Patel

10

10 supermolecole dai superatomi

Un nuovo modo per progettare molecole e materiali utili che la tavola periodica non prevede

È vero che la tavola periodica sembra piena di elementi, ma i chimici e gli scienziati dei materiali ne vorrebbero ancora di più, grazie. Il motivo è che nella corsa alla progettazione di materiali sintetici con caratteristiche insolitamente utili – per esempio un superconduttore come il silicio con la biodegradabilità del legno – la natura pone dei limiti.

«Spesso si vorrebbe un atomo che in realtà non esiste», spiega Colin Nuckolls, professore di chimica alla Columbia University. Questa esigenza potrebbe essere soddisfatta da molecole costituite dai cosiddetti superatomi, cioè *cluster* (aggregati) di atomi che si comportano come singole unità di un elemento. Ai superatomi si possono conferire proprietà elettroniche e magnetiche che sarebbe difficile o impossibile ottenere usando le combinazioni naturali degli elementi. Ma sebbene i chimici sappiano da decenni come si creano i superatomi, non hanno ancora trovato un modo affidabile di collegarli per ottenere strutture più grandi. Adesso il gruppo di Nuckolls ha scoperto un metodo per costruire «molecole su misura» usando i superatomi. Queste strutture sintetiche potrebbero imitare le proprietà delle molecole presenti in natura e al tempo stesso permettere agli scienziati dei materiali di «perfezionare» le caratteristiche di quelle molecole per soddisfare esigenze specifiche. «Le proprietà chimiche o magnetiche delle molecole formate da superatomi si possono modificare facilmente, in modi che non sarebbero possibili con strutture atomiche singole», spiega Nuckolls. «È come aggiungere un'altra dimensione alla tavola periodica».

Walter Knight e i suoi collaboratori all'Università della California a Berkeley hanno scoperto i superatomi nel 1984, sintetizzando cluster di atomi di sodio, il cui guscio elettronico esterno si comportava come quello di un solo atomo, migliorando le proprietà magnetiche e reattive. Da allora gli scienziati hanno realizzato superatomi di alluminio, platino, rubidio e altri elementi. Ma per combinarli in molecole più grandi dovevano capire le particolari leggi chimiche su cui si basano i superatomi, diverse da quelle dei loro cugini nella tavola periodica.

Gli elettroni si dispongono naturalmente attorno al nucleo di un atomo secondo una modalità ordinata, detta *Aufbau*: occupano i livelli di energia più bassi prima di quelli più alti. (Aufbau in tedesco significa «costruzione»; il principio è stato introdotto da Niels Bohr e sviluppato da Wolfgang Pauli, due pionieri della meccanica quantistica.)

Partendo da una scoperta iniziale della dottoranda Anouck Champsaur, il gruppo di Nuckolls ha iniziato a scoprire le basi di un principio analogo all'Aufbau per realizzare molecole sintetiche con i superatomi. Finora il gruppo ha costruito molecole con due e tre superatomi di cobalto e selenio. Ma Champsaur e Nuckolls credono che l'Aufbau dei superatomi permetterà di sintetizzare materiali con potenziali applicazioni per sensori flessibili, abbigliamento *smart* e batterie ad alta efficienza. I libri di chimica – spiega Nuckolls – non dovranno aggiornare la tavola periodica: «Sarebbe alchimia». Ma le molecole di superatomi sono «un modo di ottenere più di quanto ci abbia dato la natura».

J.P.

I superatomi sono cluster che si comportano come singole unità atomiche; le supermolecole, come il complesso di cobalto e selenio qui sotto, sono combinazioni di superatomi, e potrebbero dare origine a nuovi materiali utili.

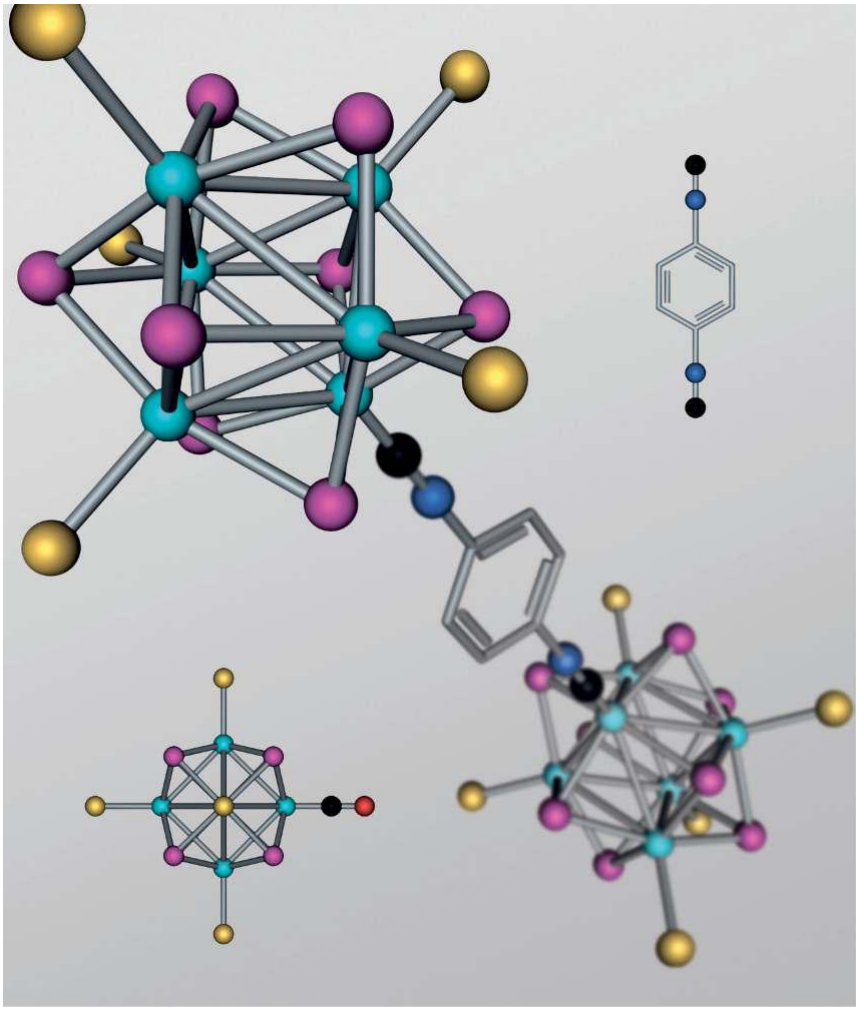


Illustrazione di Kenneth Ewart; fonte: *Building Diatomic And Triatomic Superatom Molecules*, di Anouck M. Champsaur e altri, in «Nano Letters», Vol. 16, n. 8, 10 agosto 2016

Juan Carlos Izpisúa Belmonte è professore presso il Gene Expression Laboratory del Salk Institute for Biological Studies.

ORGANI UMANI DA CORPI ANIMALI

Gli scienziati stanno muovendo i primi passi verso la crescita di parti di ricambio per esseri umani nel corpo di maiali, mucche e altri animali

di Juan Carlos Izpisúa Belmonte

Ogni anno decine di migliaia di persone subiscono un trapianto d'organo. Sebbene le conoscenze mediche sul trapianto di organi siano aumentate rapidamente, il numero di organi donati è rimasto indietro. È difficile reperire statistiche globali, ma in media ogni giorno 16 persone in Europa e 22 negli Stati Uniti muoiono aspettando un trapianto cardiaco, di fegato o di altro organo. Per di più il divario fra il numero di persone che hanno bisogno di un nuovo organo e il numero di organi disponibili per la donazione continua ad allargarsi.

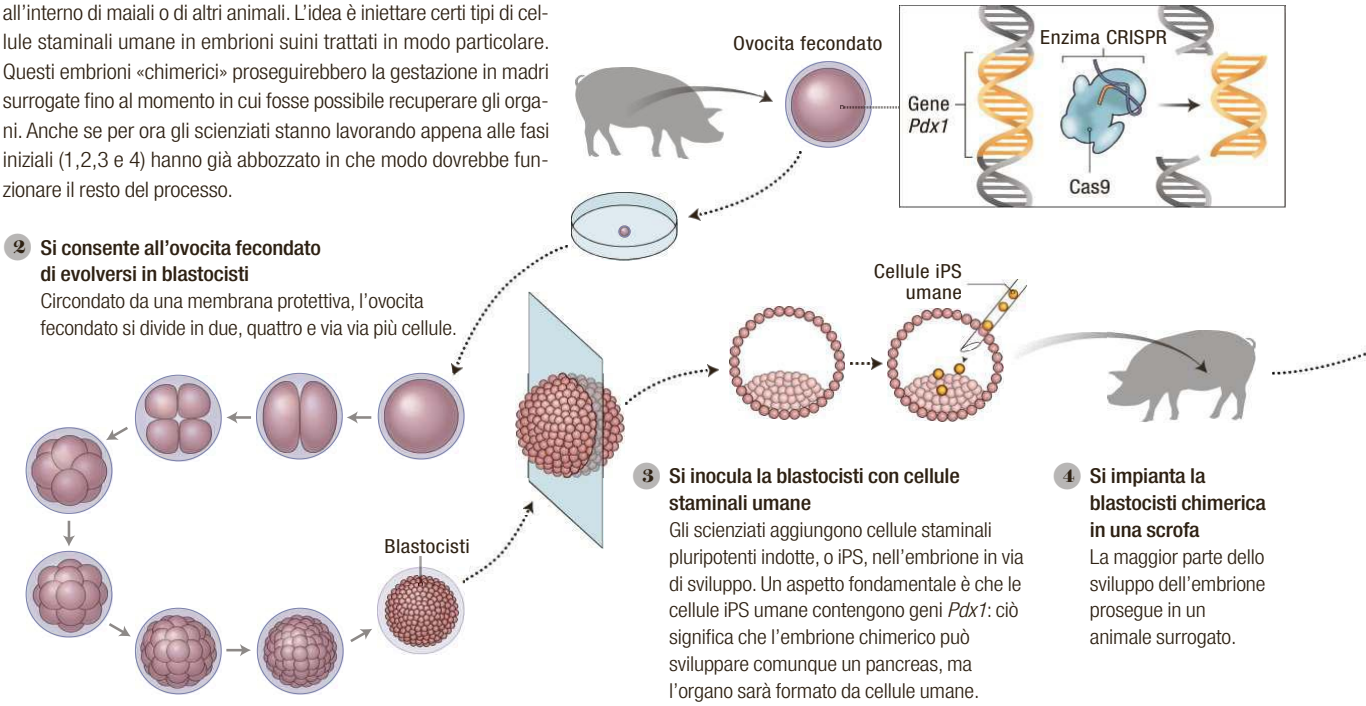
Un modo per attenuarlo sarebbe far crescere organi sostitutivi in laboratorio. Pochi anni fa si sperava di riuscirci usando cellule staminali, ovvero cellule progenitrici in grado di dare origine a diversi tipi di tessuto, e un'impalcatura artificiale per creare un organo nuovo. Tuttavia organizzare lo sviluppo di cellule staminali per produrre un organo umano funzionante si è rivelato arduo: le ricerche in questo campo continuano, ma i progressi sono lenti.

Alcuni ricercatori, tra cui il sottoscritto, ritiengono però che ci possa essere un'altra via: lasciar fare il lavoro pesante alla natura. L'evoluzione ha già creato un raffinato processo per far sì che una manciata di cellule identiche si trasformino negli organi e nei tessuti specializzati necessari per costruire un organismo intero, che si tratti di un topo o di un essere umano. Il processo avviene nelle settimane e nei mesi successivi al momento in cui un uovo fecondato dà origine a un embrione che cresce e – senza alcuna impalcatura artificiale – si sviluppa in un animale completo, con cuore, polmoni, reni e altri tessuti tutti ben formati. Crediamo che sia

Peter Horvath

Il progetto di ricerca

Recenti progressi nelle tecnologie delle cellule staminali potrebbero consentire di far crescere organi umani come il pancreas o i reni all'interno di maiali o di altri animali. L'idea è iniettare certi tipi di cellule staminali umane in embrioni suini trattati in modo particolare. Questi embrioni «chimerici» proseguirebbero la gestazione in madri surrogate fino al momento in cui fosse possibile recuperare gli organi. Anche se per ora gli scienziati stanno lavorando appena alle fasi iniziali (1,2,3 e 4) hanno già abbozzato in che modo dovrebbe funzionare il resto del processo.



possibile trovare il modo per ottenere organi da animali, come i maiali, per usarli nell'uomo.

Un cuore suino normale sarebbe davvero poco utile a un essere umano che ha bisogno di un trapianto. Anzitutto, il nostro sistema immunitario rigetterebbe drasticamente un trapianto diretto fra specie diverse. (Le valvole cardiache suine sostituiscono adeguatamente il tessuto umano solo dopo aver subito un trattamento chimico che impedisce questa reazione immunitaria, e che distruggerebbe la capacità di funzionare di un organo complesso).

I miei colleghi e io riteniamo che sia possibile far crescere organi umani – costituiti interamente, o quasi interamente, da cellule umane – in un animale come il maiale o la mucca. L'animale che ne risulterebbe sarebbe una chimera: una creatura che combina parti appartenenti a due specie diverse, più o meno come il mitico grifone con testa e ali d'aquila e il corpo di un leone. Il nostro sogno è produrre una chimera iniettando cellule staminali umane in embrioni animali adeguatamente allestiti in modo che, una volta che siano completamente cresciuti, contengano alcuni organi formati da cellule umane.

L'idea può suonare assurda, ma negli Stati Uniti e in Giappone è già stato dimostrato che in linea di principio è possibile. Diversi gruppi hanno inoculato cellule staminali di ratto in embrioni di topo ingegnerizzati su misura, e poi hanno consentito alle chimere che ne sono derivate di svilupparsi dentro madri murine surrogate. Dopo alcune settimane di gestazione sono nati animali che avevano l'aspetto e il comportamento di topi, ma il pancreas di un ratto.

Ricercatori del mio laboratorio e altri gruppi si sono spinti un passo più in là, iniettando cellule staminali umane in embrioni di maiale. Alcune di queste cellule hanno attecchito, confermando che il tessuto umano aveva iniziato a svilupparsi normalmente. Quindi abbiamo trasferito gli embrioni chimerici in scrofe surrogate, consentendone lo sviluppo per tre-quattro settimane. Una volta completati vari altri esperimenti intermedi permetteremo agli embrioni di crescere per un paio di mesi, determinando quindi quante delle loro cellule sono di origine umana. Se questi esperimenti avranno successo – e se saremo autorizzati dalle autorità competenti – prevediamo di consentire agli embrioni di svilupparsi fino alla fine (quattro mesi per i maiali).

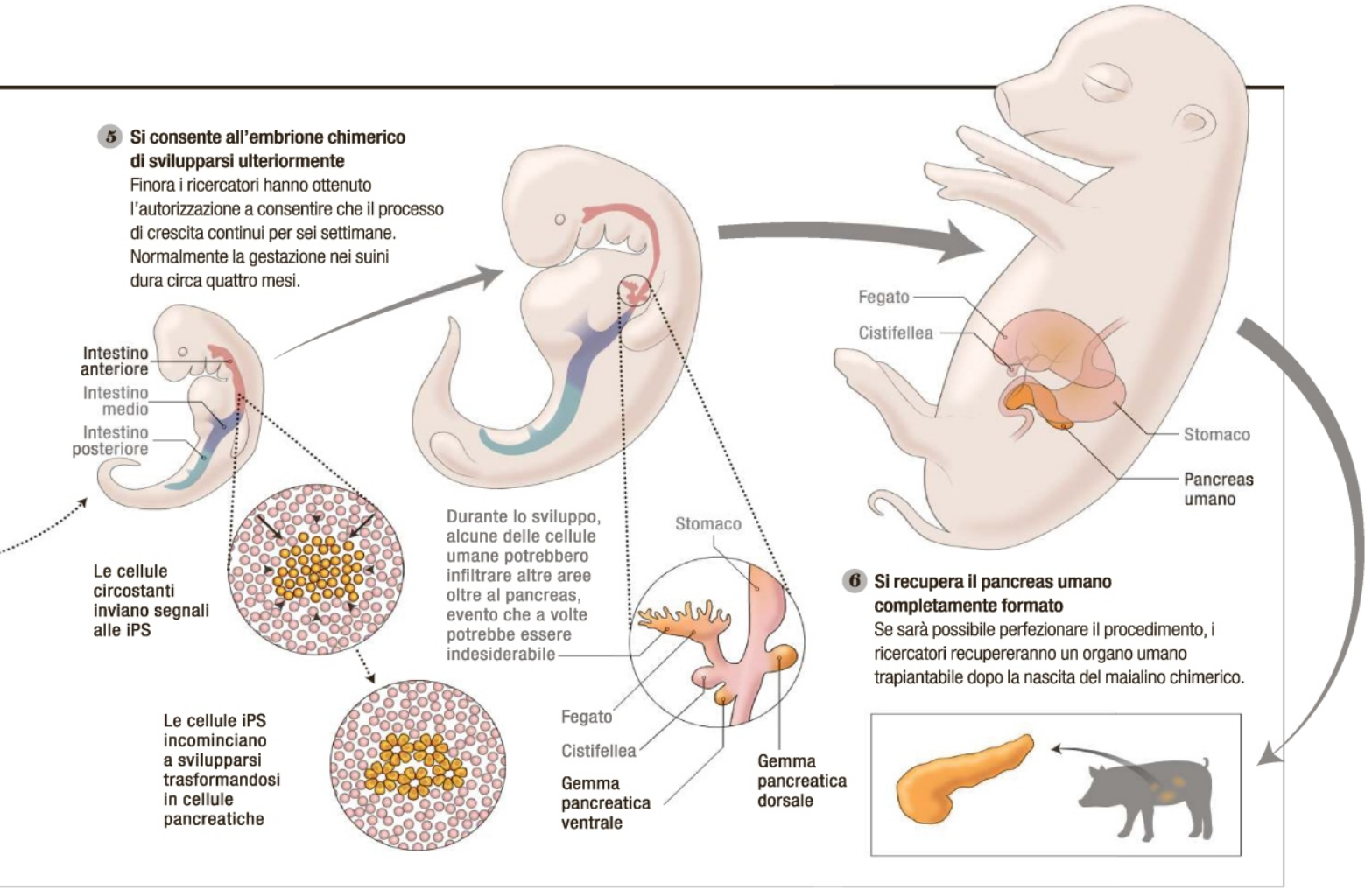
IN BREVE

I biologi stanno cercando di capire come far crescere organi umani all'interno di animali come i maiali grazie ai recenti progressi nella tecnologia delle cellule staminali. Un risultato simile farebbe diminuire drasticamente la carenza di organi da trapianto.

L'idea è prendere cellule staminali umane e impiantarle all'interno di embrioni suini allestiti per far sì che l'organismo che ne risulta, chiamato chimera, si sviluppi in un animale con pancreas, reni o altri organi umani.

Se gli esperimenti pilota avranno successo e i ricercatori avranno l'autorizzazione delle autorità competenti, l'obiettivo è consentire alle chimere di proseguire lo sviluppo fino al termine della gestazione (quattro mesi per i maiali), per vedere se produrranno organi umani utilizzabili.

Amanda Montañez



Siamo lontani dal passo finale per la produzione di maialini chimerici. Abbiamo ancora moltissimo da imparare sul modo migliore di preparare le staminali umane e gli embrioni animali in modo da garantire che le chimere rimangano vitali durante la gravidanza. Molte cose potrebbero andare storte. Ma anche se non riuscissimo a creare organi completamente formati le tecniche elaborate dovrebbero aiutarci a capire meglio l'inizio, la progressione e l'esito clinico di molte malattie. Se avesse successo, questo approccio potrebbe avere enormi conseguenze per i trapianti d'organo.

Imparare dalla natura

Negli ultimi anni i biologi hanno imparato così tanto sulla crescita degli embrioni da poter iniziare cautamente ad alterare il processo in base alle nostre esigenze. Sappiamo anche quanto questa crescita sia guidata dalla posizione precisa di cellule diverse in tempi diversi, all'interno dell'organismo in via di sviluppo. Le cellule sintetizzano e rilasciano proteine specializzate chiamate fattori di crescita che, a seconda della loro concentrazione in regioni diverse dell'embrione, attivano e silenziano numerosi programmi genetici interni. Affidandosi a queste conoscenze ancora parziali e procedendo per tentativi ed errori, i ricercatori del nostro e di altri laboratori stanno manipolando embrioni suini in modo da produrre tessuti che potrebbero dare origine a un rene, a un pancreas o a un altro organo umano.

Tra i materiali grezzi che usiamo vi sono ovociti suini e sperma (ottenuto da animali), oltre a cellule staminali umane (ottenute da colture cellulari). Fecondiamo un ovocita suino con sperma suino e qualche ora dopo le cellule unite, che ora formano uno zigote, si dividono in due e poi in quattro cellule apparentemente identiche. Ciascuna di queste cellule attiva gli stessi gruppi di geni nel suo DNA, e ciò porta alla produzione di diverse proteine che spingono le cellule, tra l'altro, a dividersi ulteriormente.

Grazie alle complesse interazioni fra geni e proteine, presto queste cellule un tempo identiche cominciano a muoversi e a comportarsi in modo diverso via via che si dividono. Nel giro di pochi giorni diverse centinaia di cellule hanno formato una sorta di sfera all'interno di una sfera, la blastocisti. È l'ultima fase in cui è possibile iniettare le cellule staminali umane, prima che comincino a formarsi i tessuti specializzati, i primordi, che in seguito daranno origine a organi funzionanti. Se aspettiamo un po' più a lungo le cellule staminali nell'embrione ospite ignoreranno le staminali esogene, che deperiranno e moriranno.

Man mano che l'embrione cresce, forma tre strati: esterno, medio e interno, e la posizione precisa di ogni cellula all'interno dell'intera struttura diventa sempre più importante. Precedenti ricerche hanno dimostrato che, per esempio, alcune cellule dello strato interno rispondono ai segnali proteici nel loro microambiente attivando il gene *Pdx1*. Questo evento, a sua volta, attiva molti altri geni che innescano la maturazione del pancreas. Un piccolo gruppo di cellule situate nello strato medio, invece, reagisce a segnali esterni attivando il gene *Six2*, che avvia la formazione dei reni. Così, sebbene tutte le cellule dell'organismo contengano le stesse sequenze di DNA, il particolare ambiente in cui si trova una cellula durante uno stadio specifico dello sviluppo determina quali geni saranno accesi e spenti, e di conseguenza quale tipo di tessuto diventerà.

Il fatto che un singolo gene come *Pdx1* o *Six2* possa attivare un intero percorso portando alla formazione di un pancreas o di un rene è molto importante per la nostra ricerca. Inattivando quell'unico gene cruciale per la crescita di un pancreas (un processo che chiamiamo «svuotare la nicchia», il nostro laboratorio ha prodotto embrioni suini che non sviluppano l'organo a meno che non si inietti un numero sufficiente di staminali umane che contengono il gene mancante. Se le cellule aggiunte si sviluppano in modo adeguato, daranno origine a un organo maturo formato interamente da cellule umane. Il resto dell'animale sarà, idealmente, formato da cellule suine.

Come accade spesso nella scienza, capire esattamente in che modo svuotare una nicchia embrionale e poi riempirla con cellule staminali provenienti da una specie diversa ha richiesto all'inizio tantissimi esperimenti sui roditori. Alla fine, nel 2010, Hiromitsu Nakauchi, all'epoca all'Università di Tokyo, e colleghi hanno riferito di essere riusciti a far crescere un topo con un pancreas di ratto. Più recentemente i miei collaboratori sono riusciti a riprogrammare geneticamente embrioni di topo in modo che usassero cellule staminali di ratto per far crescere cellule negli occhi. Dopo tre settimane di gestazione in madri murine surrogate, questi embrioni sono diventati feti di topo con cellule di ratto negli occhi.

Per affrontare le sfide etiche, sociali e normative poste da queste ricerche noi scienziati dobbiamo lavorare con il pubblico

Le sfide da affrontare

Ogni fase del percorso esige un'attenta valutazione dei diversi potenziali problemi. Dato che i topi sono troppo piccoli per produrre organi di dimensioni utili per pazienti umani, ora abbiamo concentrato i nostri sforzi sulla produzione di embrioni di maiale. I maiali e i loro organi possono crescere fino a raggiungere quasi ogni dimensione utile per pazienti di diversa corporatura. I maiali hanno anche un periodo gestazionale più lungo dei topi (che si sviluppano completamente in circa 20 giorni). Poiché gli embrioni umani normali richiedono nove mesi per svilupparsi del tutto, i ricercatori stanno inventando alcuni trucchi biochimici per aiutare le staminali umane ad accelerare il loro orologio interno in modo da maturare, o differenziarsi, seguendo il ritmo dell'embrione ospite. Adattare le cellule umane alle tempistiche suine dovrebbe richiedere un minore impegno che allinearne lo sviluppo ai tempi assai più brevi del topo.

Attualmente ci siamo concentrati sulla crescita di un pancreas o di un rene fatto di cellule umane perché sappiamo che un unico gene dà inizio al suo sviluppo nell'embrione, secondo un processo abbastanza diretto. Altri organi come il cuore, tuttavia, potrebbero dipendere da un maggior numero di geni per l'avvio del processo, e ciò significa che svuotare la nicchia per questi organi richiederebbe l'eliminazione di più di un gene. Di recente, ricercatori guidati da George Church della Harvard University hanno adattato il sistema di editing genomico CRISPR/Cas9 per rimuovere vari geni da diversi siti nel DNA di un embrione. Perciò, se si dovesse scoprire che servono manipolazioni genetiche più sofisticate per ottenere altri organi, i ricercatori sono pronti.

Un problema maggiore è stato avere la certezza che le cellule staminali usate siano abbastanza pure da dare origine a qualsiasi genere di tessuto. I biologi definiscono questo stato fisiologico come una fase in cui le cellule sono «ingenue» dal punto di vista dello sviluppo. Le cellule staminali embrionali umane, che potrebbero essere recuperate dagli zigoti residui della fecondazione in vitro, farebbero al caso nostro, ma il loro uso potrebbe rivelarsi piuttosto controverso.

Nel decennio scorso sono stati compiuti importanti progressi tecnici che hanno fatto sperare di risolvere il dilemma. I ricercatori sono riusciti a capire come indurre cellule mature prelevate dalla pelle o dall'intestino di un adulto a diventare un tipo di cellula staminale chiamata cellula staminale pluripotente indotta, o iPS. Effettuare esperimenti su cellule iPS umane anziché su staminali embrionali umane sarebbe certo più accettabile dal punto di vista etico. E prima o poi l'uso delle iPS consentirebbe di ottenere organi geneticamente e immunologicamente compatibili per singoli pazienti.

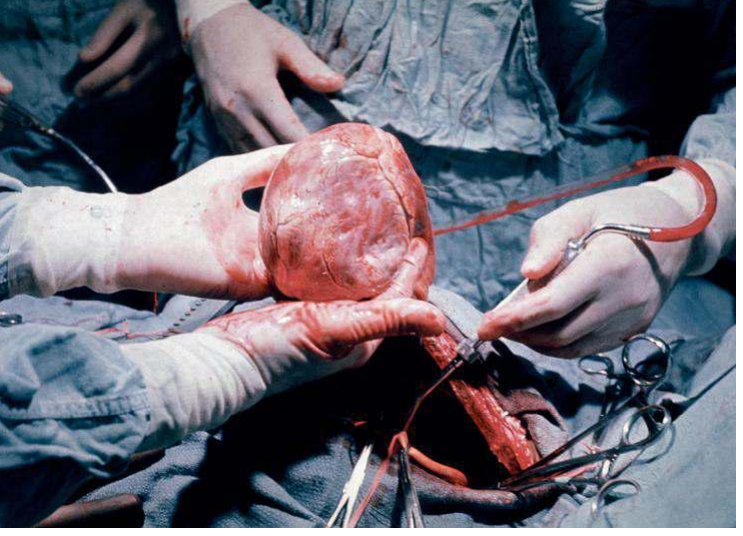
Uno studio più puntuale sulle cellule iPS realizzate finora mostra però che non sono così «ingenue» quanto dovrebbero per sopravvivere all'interno di un embrione chimerico. Sono già abbastanza differenziate, e in procinto di diventare una delle diverse specie cellulari da non essere più in grado di rispondere ai segnali biochimici provenienti dall'embrione che dicono loro di crescere differenziandosi in un diverso tipo cellulare. Poiché queste cellule iPS non rispondono in modo corretto, l'embrione in via di sviluppo le rigetta, considerandole estranee.

Di recente Jun Wu, che lavora nel mio laboratorio, ha iniziato a trattare iPS umane con un cocktail di fattori di crescita che consente almeno a un piccolo numero di queste cellule di reagire in modo appropriato a una gamma più ampia di segnali embrionali. A oggi, il nostro gruppo ha ottenuto risultati preliminari che dimostrano come le nostre cellule iPS umane trattate possano, di fatto, integrarsi nelle blastocisti. Abbiamo interrotto lo sviluppo degli embrioni sperimentali a tempi diversi dopo la fecondazione, e li abbiamo analizzati al microscopio per controllare fino a che punto le cellule dell'ospite e del donatore si fossero mescolate. In seguito intendiamo consentire agli embrioni di svilupparsi un po' più a lungo, fino a raggiungere le sei settimane. A quel punto, gli embrioni cominceranno a produrre i precursori dei diversi tessuti e organi del corpo.

Tuttavia, anche se saremo in grado di produrre iPS umane capaci di integrarsi completamente in embrioni suini, non saremo certi del successo finale. In termini evolutivi, uomini e maiali non sono strettamente imparentati quanto i topi e i ratti che sono già stati usati per creare animali chimerici. Pertanto le iPS umane potrebbero aver perduto la capacità di percepire tutti i segnali biochimici di una specie imparentata più alla lontana quale il maiale. Se non riusciremo a scoprire uno stratagemma biochimico che ci permetta di aggirare questo problema, potremmo dover incominciare a testare le nostre idee in altre specie, come le mucche.

I prossimi passi

Nel 2012 discutevo di queste e altre perplessità con il mio collaboratore Josep Maria Campistol, direttore generale della Hospital Clinic di Barcellona, riconosciuta a livello internazionale per i servizi di trapianto d'organo che offre. Ricordo vividamente il consiglio che mi diede: «L'unico modo per determinare se le cellule iPS umane possono attraversare le barriere di specie e concorrere alla formazione di un organo umano in un maiale è rimboccarsi le maniche e fare l'esperimento», disse.



Donatori umani. La sopravvivenza dei pazienti è migliorata da quando, nel 1968, è stato trapiantato questo cuore, ma la carenza di organi da trapianto è aumentata.

L'affermazione di Campistol mi spinse immediatamente ad agire. Sapevo che il nostro laboratorio non sarebbe riuscito a raggiungere un simile obiettivo lavorandoci da solo. Assieme a embriologi, veterinari, biologi esperti di cellule staminali ed esperti di bioetica, i miei colleghi e io abbiamo aggregato un consorzio internazionale finalizzato a saggiare le nostre idee. Abbiamo iniziato a iniettare iPS umane in embrioni di maiale nel 2015. Sono particolarmente grato alla Universidad Católica San Antonio di Murcia, in Spagna, e alla Moxie Foundation, per aver sostenuto questo lavoro preliminare quando nessuno credeva che il nostro approccio fosse addirittura fattibile.

Finora la maggior parte dei nostri esperimenti è stata condotta in California e in Spagna, sotto la supervisione di agenzie regolatorie locali e nazionali. Per ora abbiamo consentito agli embrioni chimerici uomo-maiale di proseguire nella gestazione per circa quattro settimane, concluse le quali sacrificavamo l'animale. (Le linee guida che abbiamo stilato con le autorità regolatorie ci richiedono di sacrificare sia le madri surrogate sia gli embrioni).

Nel complesso i risultati ottenuti da questi e altri esperimenti ci hanno aiutato ad acquisire alcune conoscenze di base sullo sviluppo degli embrioni chimerici. Stiamo iniziando a capire quale sia il miglior numero di cellule iPS umane che bisogna impiantare affinché l'embrione si sviluppi con successo, e in quale fase dello sviluppo bisogna impiantarle. Abbiamo anche iniziato a tracciare in che modo le cellule umane iniziano a migrare per dirigersi verso regioni diverse dell'embrione.

Un equilibrio etico

Anche se noi scienziati perfezioniamo i nostri protocolli, per affrontare le nuove sfide etiche, sociali e normative che presenta questo nuovo settore di ricerca dobbiamo lavorare insieme all'opinione pubblica. Per mettere a punto le linee guida che regolano la nostra ricerca, il nostro consorzio ha collaborato a stretto contatto con eticisti e giuristi in California e Spagna per un anno e mezzo.

Ovviamente ci atteniamo alle regole standard che riguardano il benessere animale e che dovrebbero applicarsi a tutte le ricerche che impiegano creature senzienti, per evitare dolore inutile e fornire spazi adeguati in cui vivere e muoversi, fra le altre cose. Ci sono però ulteriori problemi che riguardano specificatamente questa tecnologia. Cellule staminali autenticamente ingenue, come ho detto, possono dare origine a qualsiasi tipo di tessuto. Ma dobbiamo porre particolare attenzione a tre tipi di cellule – neuroni, spermatozoi e ovociti – perché l'umanizzazione di questi tessuti negli animali potrebbe dare origine a creature che nessuno ha intenzione di realizzare.

Immaginate l'incubo etico, per esempio, se un numero sufficiente di neuroni umani popolasse il cervello di un maiale, e se questi diventasse capace di ragionamenti superiori. Possiamo impedire questo problema cancellando il programma genetico che sottende allo sviluppo neurale di tutte le cellule iPS prima di iniettarle nell'ospite. In questo caso, anche se le cellule staminali umane riuscissero a migrare fino alla nicchia embrionale responsabile della crescita cerebrale, non riuscirebbero a svilupparsi ulteriormente. Gli unici neuroni che riuscirebbero a crescere sarebbero al 100 per cento suini.

Un altro scenario che i ricercatori vogliono evitare, per ragioni che tra breve saranno chiare, è l'incrocio fra animali chimerici. Sebbene sia altamente improbabile, c'è sempre la possibilità che qualcuna delle cellule staminali umane che impiantiamo possa migrare fino alla nicchia che dà origine al sistema riproduttivo, anziché rimanere in una nicchia che produce l'organo desiderato. Il risultato sarebbero animali che producono spermatozoi od ovociti virtualmente identici a quelli che si trovano nell'uomo. Se si consentisse poi a questi animali di accoppiarsi fra loro si potrebbe arrivare al caso eticamente disastroso in cui un feto completamente umano (il risultato di uno spermatozoo umanizzato di un maiale che fecondasse un uovo umanizzato di un altro) comincerebbe a crescere all'interno di un animale da fattoria. Il modo migliore per impedire un simile risultato è assicurarsi che ciascun animale chimerico usato per trapianti venga generato, per così dire, da zero, fecondando ovociti di un maiale con spermatozoi di un altro maiale e aggiungendovi poi le cellule staminali umane.

La partita sarebbe chiusa, naturalmente, se le sfide tecniche si rivelassero insormontabili. Ma anche se fallissimo nel produrre organi funzionali da usare per i trapianti credo che le conoscenze e le tecniche che scopriremo lungo il cammino potrebbero rivelarsi incredibilmente preziose. Uno dei primi ambiti a beneficiare di tutto ciò sarebbe senza dubbio la ricerca sul cancro. Alcuni studi dimostrano come molti tumori crescano in maniera incontrollabile in un bambino o in un adulto riattivando alcuni geni (ma non tutti) che un tempo avevano consentito all'embrione di evolversi fino a diventare un feto. Così, quanto maggiore sarà la comprensione da parte dei ricercatori dei segnali cellulari normali che consentono agli embrioni di crescere, dicendo loro quando interrompere il processo di crescita, tanto meglio potrebbero riuscire a indurre le cellule tumorali ad abbandonare il loro nefasto cammino.

Naturalmente, anche noi scienziati siamo esseri umani. Ci elettrizziamo per nuove idee e nuovi modi di realizzare esperimenti. E possiamo essere eccessivamente ottimisti sul possibile significato recondito delle nostre scoperte, non solo nei nostri settori, ma anche per l'umanità. Tuttavia i risultati preliminari che ho descritto in questo articolo mi fanno essere cautamente ottimista sulla possibilità di generare organi umani da embrioni animali chimerici entro i prossimi vent'anni. ■

PER APPROFONDIRE

Generation of Rat Pancreas in Mouse by Interspecific Blastocyst Injection of Pluripotent Stem Cells. Kobayashi T. e altri, in «Cell», Vol. 142, n. 5, p. 787, 3 settembre 2010.

Dynamic Pluripotent Stem Cell States and Their Applications. Wu J. e Izpisua Belmonte J.C. in «Cell Stem Cell», Vol. 17, n. 5, novembre 2015.

La cura che viene da dentro. Hochedlinger K., in «Le Scienze» n. 503, luglio 2010.

Getty Images

SCIENZE DELLA TERRA

Il vulcano alle

porte di Roma

L'area vulcanica dei Colli Albani è in uno stato di quiete da decine di migliaia di anni, ma non è inattiva. E ora sta dando segni di risveglio. I recenti allarmismi mediatici, però, sono privi di fondamento

di Fabrizio Marra

Fuori porta. Veduta del Lago Albano, detto anche di Castel Gandolfo, in una zona conosciuta come Castelli Romani, 20 chilometri a sud-est del centro di Roma.

Fabrizio Marra è primo ricercatore dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) e il suo campo di studi è la geologia dell'area romana. Le sue attività di ricerca includono lo studio dei rapporti tra glaciazioni, variazioni del livello del mare e processi sedimentari, e lo studio della storia eruttiva dei distretti vulcanici che circondano la città di Roma e che hanno fornito i materiali (tufi e pozzolane) con cui Roma è stata costruita.

Numerosi studiosi hanno sostenuto che ci siano state eruzioni in tempi storici ai Colli Albani, il distretto vulcanico che sorge 20 chilometri a sud-est di Roma, anche basandosi sull'errata interpretazione dei miti romani riportati da Tito Livio, che narrano di «piogge di sassi» e «fuochi nella selva albana». Ultimi in ordine di tempo, all'inizio di questo secolo alcuni vulcanologi avevano creduto di aver trovato le prove delle catastrofiche esondazioni del Lago Albano che, secondo quanto riportato da Dionigi di Alicarnasso, sarebbero avvenute nel 398 a.C. e avrebbero indotto i Romani a costruire l'emissario del lago, in modo da impedire ulteriori tracimazioni delle acque.

È toccato a me, in qualità di coordinatore di un gruppo di ricerca finanziato nell'ambito dei progetti strategici promossi dal Dipartimento di Protezione Civile e dall'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) nel triennio 2003-2006, deludere ancora una volta le aspettative dei più fantasiosi, e dimostrare che a oggi non esistono le prove di queste manifestazioni vulcaniche.

Tra i diversi elementi emersi nel corso del progetto, lo studio delle caratteristiche costruttive del tunnel emissario scavato dai Romani è stato decisivo. Quello studio ha infatti dimostrato che, a differenza di quanto affermato dai sostenitori delle esondazioni, il tunnel non avrebbe potuto essere realizzato con un livello del lago superiore a quello del tunnel stesso.

Lo scavo fu eseguito da due squadre di operai specializzati, i *fossores*, che lavoravano in direzioni opposte: l'una dal lago, l'altra dall'esterno della cinta craterica. Il tratto scavato dall'interno del cratere verso l'esterno partì alcuni metri al di sopra del livello delle acque del lago, con una maggiore inclinazione verso il basso. In corrispondenza del punto in cui lo scavo incontrava la prosecuzione ideale della galleria iniziata dall'esterno, l'inclinazione fu cambiata in maniera da renderla identica a quella della galleria opposta, e da proseguire fino all'incontro dei due tunnel. Questo artificio permetteva di scavare tutta la galleria a secco partendo dai due versanti opposti e di dimezzare i tempi di esecuzione. Completato il congiungimento, il livello di base nel tunnel più inclinato fu abbassato, fino a farne lambire la superficie del lago e far iniziare il deflusso dell'acqua. Nel 398 a.C., quindi, il livello del lago non poteva essere più alto della quota a cui si trova l'emissario costruito dai Romani: 70 metri al di sotto del punto più basso dell'orlo craterico da cui sarebbero dovute tracimare le acque! Troppo anche per un «prodigio» come quello descritto da Dionigi. A ben leggere le fonti, infatti, si sarebbe trovato che Tito Livio descrisse lo stesso fenomeno come «un insolito innalzamento delle acque del lago», mentre Cicerone riportò che «Il Lago Albano... superò il solito livello di stagno».

Nell'ambito del progetto strategico abbiamo anche accertato l'assenza di qualsiasi attività eruttiva dopo l'ultimo evento avvenuto 36.000 anni fa proprio nel cratere di Albano, eliminando anche i dubbi su possibili prodotti vulcanici più recenti di 5000 anni, ipotesi formulata a corollario delle presunte tracimazioni del lago. Questa età recente era risultata da una datazione effettuata con il metodo del radiocarbonio sui suoli sottostanti i depositi vulcanici: una procedura risultata inattendibile. Gli stessi depositi, datati con il metodo degli isotopi dell'argon hanno rivelato età comprese tra 69.000 e 36.000 anni fa, corrispondenti a quelle dei prodotti degli ultimi due cicli eruttivi di Albano.

Tuttavia, gli studi che ho continuato a condurre nell'ultimo decennio in collaborazione con un gran numero di esperti italiani e internazionali hanno reso giustizia a chi non si è mai rassegnato

IN BREVE

L'area vulcanica a una ventina di chilometri in direzione sud-est dal centro di Roma, conosciuta come Colli Albani, non è estinta.

Gli scienziati hanno ricostruito la storia delle eruzioni avvenute in questo distretto vulcanico, insieme a quella delle deformazioni della crosta terrestre che hanno accompagnato nel tempo la sua evoluzione e hanno dimostrato che quest'area non solo è attiva, ma addirittura dà segni di risveglio.

La quiete eruttiva dura ormai da 36.000 anni, un intervallo che si avvicina molto al tempo di quiescenza medio calcolato dai ricercatori.

Non è però possibile fare previsioni sui tempi in cui potrebbe avvenire una nuova eruzione. Di sicuro ci vorranno secoli, più probabilmente millenni prima, che il magma trovi una via di risalita fino alla superficie.

Pagine precedenti: Angelo Giampiccolo/Alamy Stock Photo

Occhio spaziale. L'area dei Colli Albani vista dallo spazio; in basso a destra si può notare il Lago Albano, a sinistra in alto una zona urbanizzata del comune di Roma e di comuni dell'area metropolitana.

a considerare i Colli Albani come un vulcano estinto: hanno dimostrato che l'area vulcanica alle porte di Roma, rimasta in stato di quiete da 36.000 anni a questa parte, comincia a dare segni di risveglio.

Questa è la conclusione di uno studio multidisciplinare, pubblicato lo scorso luglio dalla rivista «Geophysical Research Letters», che ho effettuato in collaborazione con altri ricercatori dell'INGV, del Dipartimento di scienze della Terra della «Sapienza« Università di Roma e dell'Istituto di geologia ambientale e geoingegneria del Consiglio nazionale delle ricerche, e con il laboratorio di geocronologia dell'Università del Wisconsin a Madison. In particolare, lo studio ha ricostruito la storia delle eruzioni avvenute nel distretto vulcanico dei Colli Albani, insieme a quella delle deformazioni della crosta terrestre che hanno accompagnato nel tempo la sua evoluzione.

Eruzioni cicliche

Gli elementi emersi sono molteplici, legati a indicatori geologici e geofisici diversi e indipendenti tra loro, ma tutti convergenti nell'indicare che l'area vulcanica è attiva e che a diversi chilometri di profondità si sta probabilmente accumulando nuovo magma. In quanto tempo questo magma potrebbe trovare una via di risalita e dare luogo a un'eruzione è difficile da stabilire con precisione; di certo i tempi fisici per cui ciò possa avvenire sono alla scala delle diverse migliaia di anni.

L'accertamento del lungo periodo di inattività durante gli ultimi 36.000 anni è proprio uno degli elementi che hanno permesso di riconoscere i segnali di un possibile risveglio dallo stato di quiete, e ha in qualche modo aumentato le probabilità di una futura eruzione, anziché ridurle. Il nostro studio ha stabilito che in tutto il periodo di attività, indipendentemente dalla grandezza dei singoli eventi, le eruzioni ai Colli Albani sono avvenute con cicli molto regolari di circa 41.000 anni, separati da periodi di quiescenza quasi assoluta della durata di circa 38.000 anni. L'ultimo ciclo eruttivo, avvenuto al cratere di Albano, è iniziato proprio 41.000 fa ed è terminato 36.000 anni fa. Ciò significa che il tempo trascorso dall'ultima eruzione non è maggiore del tempo medio di ricorrenza: concetto a cui ci si riferisce per definire attivo un vulcano.

L'insieme degli studi effettuati dall'INGV negli ultimi 15 anni in collaborazione con i più importanti centri di geocronologia internazionali specializzati nella datazione di rocce (il Berkeley Geochronology Center e il Wiscar Laboratory dell'Università del Wisconsin a Madison), ha ricostruito la storia eruttiva dei Colli Albani dai lontani inizi della loro attività, oltre 600.000 anni fa, fino a oggi, e ha fornito le premesse per la ricerca pubblicata a luglio. Si è giunti a questo risultato grazie a un grande numero di datazioni (oltre 100) effettuate con il metodo del decadimento di isotopi dell'argon, elemento abbondante nelle rocce vulcaniche, su gran parte dei prodotti eruttivi affioranti nell'area romana, riconosciuti e campionati a uno a uno durante uno studio geologico durato quasi vent'anni.

Il quadro ottenuto è sintetizzato in un grafico in cui i singoli cicli eruttivi sono rappresentati come in un istogramma in funzione della grandezza (volumi eruttati) e del tempo (*si veda il box a p. 56*). Per il periodo precedente a 600.000 anni fa, per cui non sono stati trovati prodotti in affioramento, è stato possibile riconoscere l'esistenza di antichi cicli eruttivi grazie alla presenza, all'interno dei prodotti datati, di «xenocristalli»: si tratta di singoli cristalli più vecchi rispetto alla «popolazione» omogenea che corrisponde al magma dell'eruzione, inglobati all'interno del magma stesso. Que-

Cortesia ESA, con dati modificati di satelliti Sentinel del 2016, programma Copernicus

Storia di un'area attiva

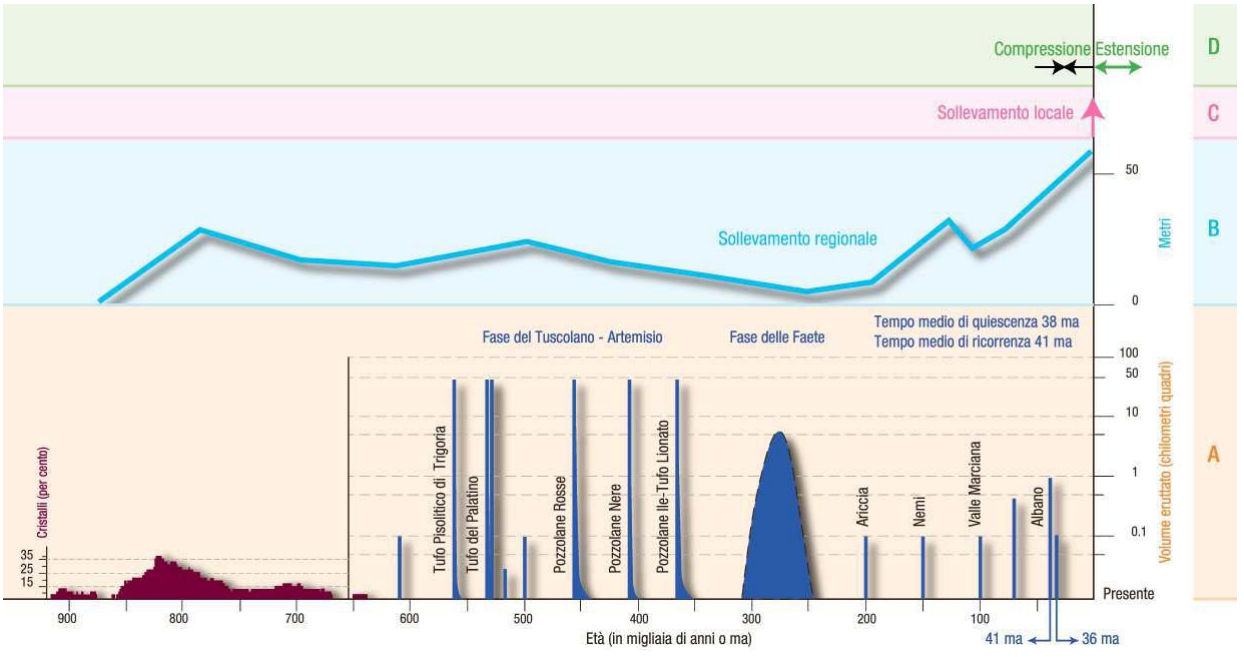
L'illustrazione qui sotto riassume gli elementi fondamentali grazie a cui è stato stabilito che i Colli Albani sono un'area vulcanica attiva e che ha avuto inizio un nuovo ciclo di ricarica delle camere magmatiche.

Lungo tutto il periodo di attività (*A*), indipendentemente dalla grandezza dei singoli eventi, le eruzioni sono avvenute con cicli molto regolari con un tempo di ricorrenza medio di 41.000 anni, calcolato dall'inizio di un ciclo a quello del successivo. A partire da 600.000 anni fa ci sono stati 13 cicli eruttivi della durata di poche migliaia di anni, rappresentati dalle asticelle verticali e dalla loro «coda»; le età sono derivate dalla datazione con isotopi di argon dei prodotti, espresse in migliaia di anni e con gli errori statistici associati indicati con ±.

I cicli eruttivi sono separati da periodi di quiescenza quasi assoluta della durata media di 38.000 anni. L'ultimo ciclo eruttivo, avvenuto al cratere di Albano, è iniziato 41.000 anni fa ed è terminato 36.000 anni fa. Questo vuol dire che il tempo trascorso dall'inizio dell'ultimo ciclo eruttivo (41.000 anni) è dello stesso ordine dei tempi di ritorno. Inoltre, il tempo trascorso dalla fine dell'ultimo ciclo (36.000 anni) è simile al tempo medio di ritorno, ma addirittura maggiore di quello, 31.000 anni, relativo agli ultimi 100.000 anni: quindi il vulcano deve considerarsi attivo e «pronto» per una nuova eruzione.

Un sollevamento regionale (*B*) simile a quelli che hanno preceduto l'inizio dell'attività vulcanica ai Colli Albani 800.000 anni fa, e l'inizio della fase esplosiva del Tuscolano-Artemisio 600.000 anni fa, è iniziato 200.000 anni fa ed è culminato con la nuova fase di attività nel cratere di Albano.

Negli ultimi vent'anni si è osservato un sollevamento di 2 millimetri per anno (*C*), localizzato nell'area dove è avvenuta l'attività più recente negli ultimi 200.000 anni. Negli ultimi 2000 anni, lo stato di sforzo della crosta terrestre nell'area albana (*D*) è cambiato da compressivo a estensionale: una condizione che favorisce la risalita di magma lungo faglie e fratture.



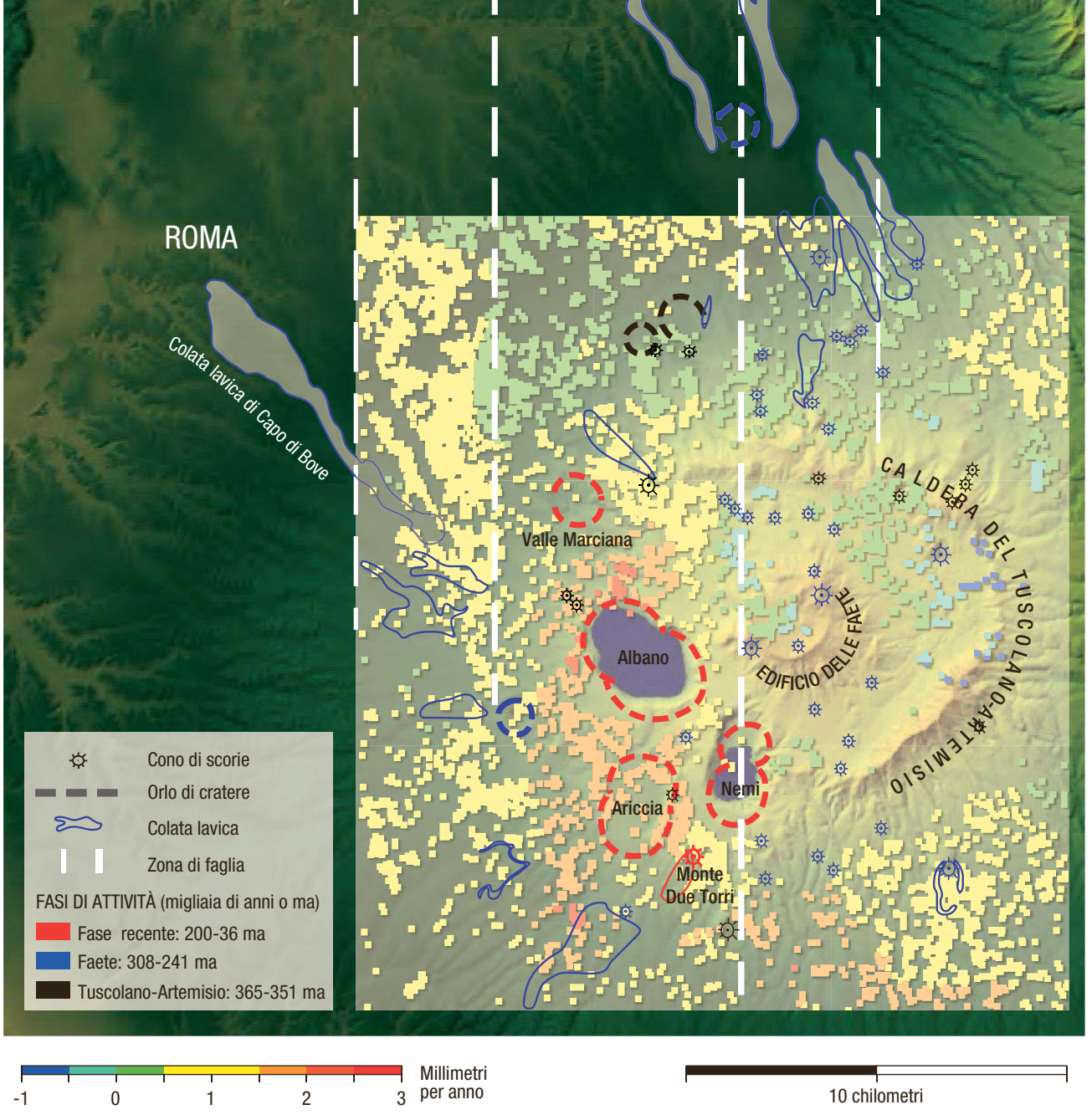
ste testimonianze di antichissime eruzioni arrivano fino a 900.000 anni fa, e in base al numero di cristalli di una determinata età è stato possibile stimare statisticamente una «frequenza eruttiva», con massimi ogni 100.000 anni.

A partire da circa 600.000 anni fa, però, l'attività si è fatta molto più intensa e frequente. Ha infatti avuto inizio la fase del Tuscolano-Artemisio, un'attività altamente esplosiva che ha determinato l'eruzione di enormi colate piroclastiche: le cosiddette «nubi ardenti» che, come nel caso della nota eruzione di Pompei, originano dal collasso della colonna eruttiva, che può raggiungere altezze di diversi chilometri, e scorrono a 360 gradi lungo i fianchi del vulcano, ricoprendo di magma diluito e incandescente le zone circostanti fino a grandi distanze.

Durante questa fase, l'area dove sarebbe sorta la città di Roma è stata completamente ricoperta più volte da depositi piroclastici spessi fino a diversi metri: questi depositi costituiscono i ben noti tufi e pozzolane (a seconda che si siano consolidati a formare vere e proprie rocce, o che siano rimasti incoerenti, a formare una sorta di dense sabbie), estratti in cave a cielo aperto o in galleria («arenari»), e usati in edilizia fin dai tempi romani.

Durante la fase del Tuscolano-Artemisio, a partire da 561.000 anni fa, sono avvenuti cinque grandi cicli eruttivi separati da intervalli di quiescenza piuttosto regolari, dell'ordine di 30.000-45.000 anni. La peculiarità che caratterizza tutta la storia eruttiva dei Colli Albani è che questa regolarità del periodo di ricorrenza si è mantenuta nel tempo, a dispetto della progressiva diminuzione dell'intensità degli eventi. Dopo un lungo periodo di quiescenza durato 57.000 anni, alla fase del Tuscolano-Artemisio è succeduta la fase delle Faete, caratterizzata da un gran numero di eruzioni di tipo «stromboliano» (termine che prende il nome dall'attività eruttiva caratteristica del vulcano di Stromboli delle isole Eolie, moderatamente esplosiva con lancio di ceneri e lapilli). Queste eruzioni

Danilo Sossi su indicazione dell'autore



Quadro di insieme. L'area in sollevamento rivelata dai dati di telerilevamento – punti rossi e arancioni, corrispondenti a tassi di 2-3 millimetri per anno – coincide esattamente con quella in cui sono localizzati i crateri dell'attività più recente.

hanno prodotto diverse colate di lava e hanno determinato la formazione di tanti piccoli edifici vulcanici (coni di scorie), sparsi in tutta l'area vulcanica. Si è trattato quindi di un'attività a carattere areale e continuata per 58.000 anni.

Dalle lave alle vie consolari

Tra le colate laviche della fase delle Faete c'è la grande colata di Capo di Bove, eruttata 278.000 anni fa da un cratere alle pendici nordoccidentali della caldera del Tuscolano-Artemisio, e che è avanzata in linea retta per oltre 10 chilometri in direzione di Roma, fermandosi proprio alle sue porte. Non solo in senso metaforico, perché è proprio dalla Porta di San Sebastiano, lungo la porzione sudorientale delle Mura Aureliane che cingono il centro storico di Roma, che parte l'Appia, l'antica via consolare che si sviluppa lungo la cresta della colata e la percorre tutta, per poi proseguire verso Napoli. E proprio con la lava leucititica (così chiamata dai tipici cristalli bianchi globulari di leucite, che conferiscono a queste lave il nome caratteristico di «occhio di pesce») della colata di Capo di Bove sono stati realizzati i basoli con cui sono pavimentate la via Appia e tante altre vie consolari romane. Allo stesso modo, in tempi più recenti le leucititi albane, non basalti come erroneamente sono spesso chiamate le lave di queste colate, estratte in diverse cave hanno fornito il materiale lavico per realizzare i famosi sampietrini che ancora ricoprono molte strade di Roma.

Dopo una nuova fase di inattività della durata di quasi 40.000 anni che ha seguito l'ultima eruzione lavica della fase delle Faete, un nuovo tipo di attività a carattere esplosivo ha avuto inizio nel cratere di Ariccia, uno dei centri eruttivi del distretto vulcanico localizzato 2 chilometri a sud da quello di Albano, a partire da 200.000 anni fa. Si tratta della cosiddetta fase recente, o «magmatica», dal nome delle eruzioni caratterizzate dall'interazione tra

Danilo Sossi su indicazione dell'autore

magma e acqua della falda, che produce prodotti particolari, chiamati «*surge* piroclastci».

Si tratta di ceneri e lapilli stratificati, che si depongono radialmente attorno al cratere a seguito delle ripetute esplosioni dovute al contatto tra magma incandescente e acqua. Queste esplosioni danno origine ad anelli di magma e vapore che si espandono come in un'esplosione nucleare, alternandosi a vere e proprie colate piroclastiche, che si formano ogni volta che si creano colonne eruttive sufficientemente alte. Nel complesso si tratta di un'attività più moderata rispetto a quella della fase Tuscolano-Artemisio, anche se ancora a carattere fortemente esplosivo e in grado di lanciare lapilli fino a grandissime distanze dal centro eruttivo. Come nel caso precedente, anche in questa fase recente i cicli eruttivi, emersi ogni volta in un cratere diverso, sono stati separati da periodi di quiescenza regolari, durati circa 50.000 anni. Ecco dunque che all'attività del cratere di Ariccia è seguita, 150.000 anni fa, quella del vicino cratere di Nemi, seguito a sua volta, circa 100.000 anni fa, da Valle Marciana, pochi chilometri a nord rispetto a quello di Albano.

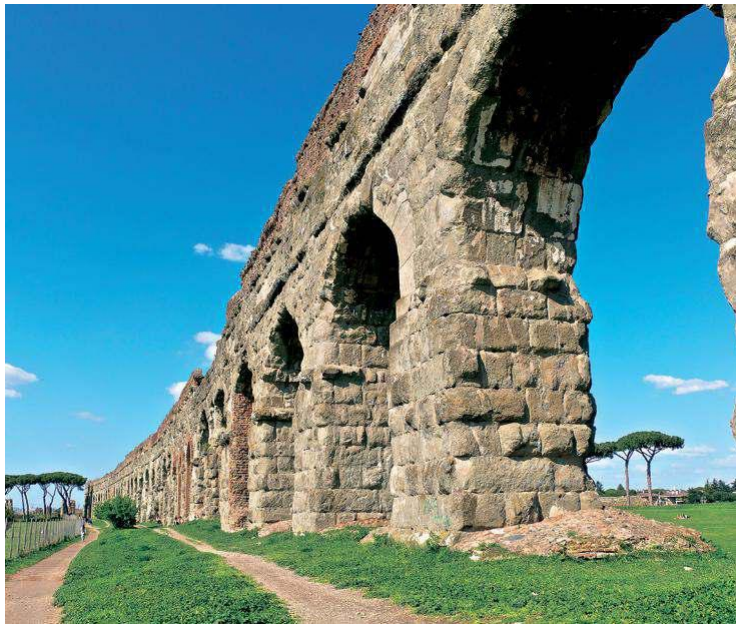
A partire da 69.000 anni fa, però, i tempi di ritorno si sono accorciati e hanno avuto una frequenza di 30.000 anni, proprio come durante le prime grandi eruzioni della fase del Tuscolano-Artemisio. Allo stesso tempo l'intensità delle eruzioni è tornata a crescere con i due cicli esplosivi avvenuti al cratere di Albano che hanno prodotto colate piroclastiche di notevoli dimensioni, come quella di 36.000 anni fa responsabile della deposizione del «peperino di Marino», o «peperino albano». Si tratta di una roccia durissima, impiegata dai Romani per realizzare sarcofagi e il basamento di templi, che deve il nome al caratteristico aspetto «sale e pepe» creato dalla presenza di abbondanti granuli neri e bianchi, costituiti rispettivamente da cristalli di pirosseno e leucite.

I prodotti dei due cicli eruttivi di Albano, avvenuti il primo 69.000 anni fa e il secondo tra 41.000 e 36.000 anni fa, hanno raggiunto distanze notevoli sia verso Roma sia soprattutto verso nord-est, dove quattro unità distali hanno scavalcato la cinta calderica del Tuscolano-Artemisio e oggi le possiamo trovare fin nei bacini intramontani dell'Appennino centrale, come il Fucino e la Piana di Sulmona, a oltre 100 chilometri di distanza. Questa decisa ripresa dell'intensità e dei volumi eruttati è testimoniata anche dal fatto che durante l'ultimo ciclo l'attività è diventata areale, con la formazione dell'edificio vulcanico di Monte Due Torri, che sorge un paio di chilometri a sud dei crateri di Ariccia e Nemi, e che 40.000 anni fa ha eruttato lava e lapilli, contemporaneamente alle violente eruzioni freato-magmatiche di Albano.

Una nuova fase

Queste caratteristiche, unite ad altre prove di cambiamenti geochimici del magma eruttato a partire da 69.000 anni fa, fanno ritenere che ad Albano sia cominciata una nuova fase vulcanica e non solo un nuovo ciclo eruttivo. L'ipotesi è ulteriormente suffragata dal fatto che l'attività di Albano ha inizio al culmine di un forte sollevamento regionale di tutta l'area laziale, messa in evidenza da studi paralleli di tettonica e paleogeografia. Si è infatti visto che negli ultimi 800.000 anni la costa prospiciente il distretto vulcanico albano e quelli del Lazio settentrionale (Monti Sabatini, Vico e Vulsini) è stata soggetta a ripetute fasi di sollevamento che hanno coinciso con l'inizio delle fasi di attività vulcanica. In particolare, un forte sollevamento è avvenuto tra 900.000 e 800.000 anni fa, contemporaneamente all'inizio delle prime fasi di attività vulcanica, mentre un secondo sollevamento è avvenuto tra 600.000 e 500.000 anni fa, all'inizio della fase esplosiva del Tuscolano-Artemisio. L'ultima fase di sollevamento, infine, mostra due gradini: il primo coincide con l'inizio della fase vulcanica recente; il secondo, più marcato, con il forte incremento di attività, in termini di volumi e di frequenza, che caratterizza i due cicli eruttivi di Albano e Monte Due Torri. Questi sollevamenti regionali sono stati messi in relazione con le fasi di risalita dal mantello dei magmi che hanno formato i vulcani laziali, causando un «rigonfiamento» della crosta terrestre.

Infrastrutture. L'acquedotto Claudio di Roma e la via Appia (*a fronte*), due infrastrutture costruite dai Romani con rocce piroclastiche (tufi) e laviche prodotte dall'area vulcanica dei Colli Albani.

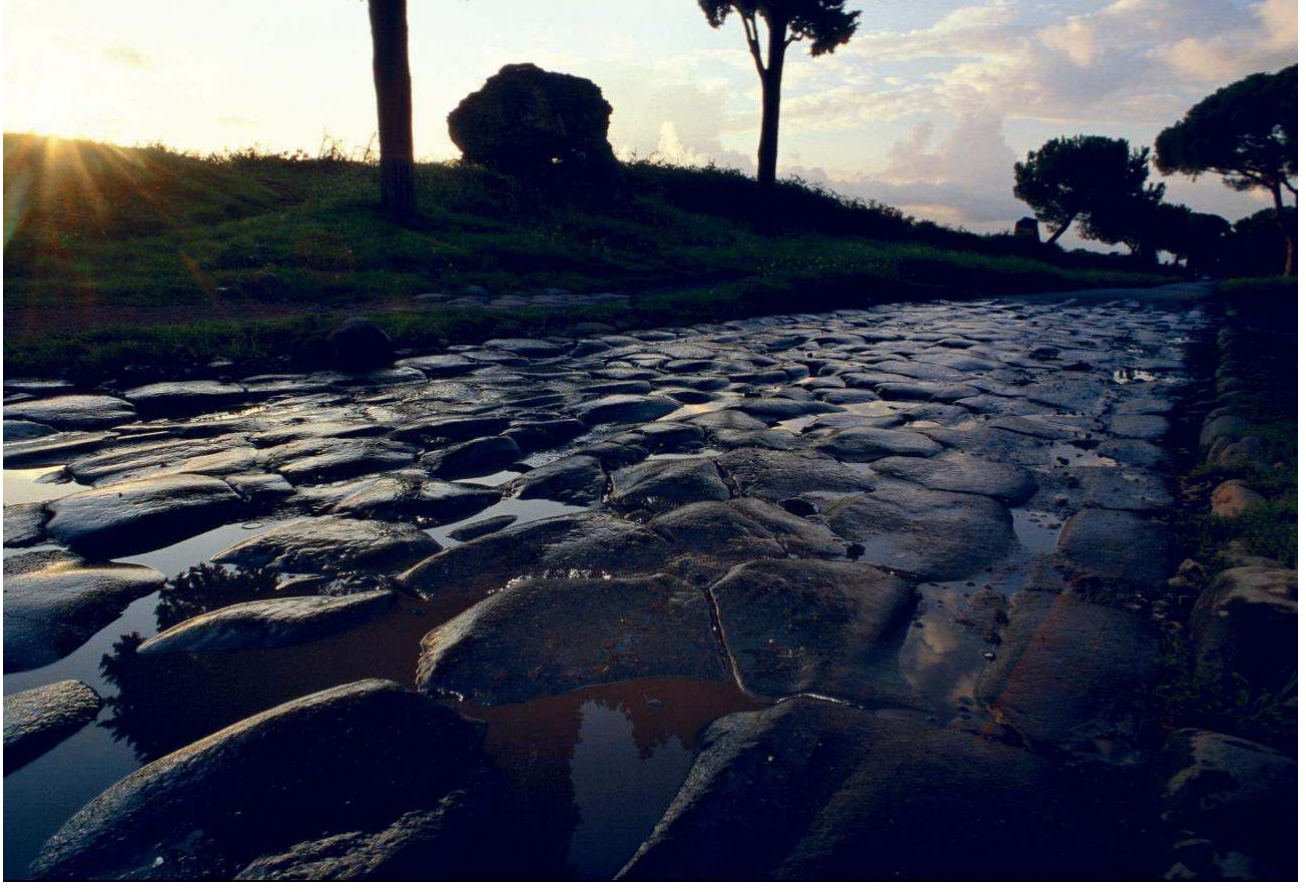


Più di recente, a questo sollevamento regionale si è sovrapposto un sollevamento locale in corrispondenza dell'area vulcanica albana, come messo in luce dagli studi di telerilevamento effettuati dall'INGV. L'elemento fondamentale per la valutazione dello stato di attività incipiente è stato che il settore in cui le osservazioni di telemetria satellitare – ovvero realizzate registrando la distanza della superficie terrestre rispetto a un satellite a ogni suo passaggio sopra un determinato punto – hanno rivelato un continuo sollevamento, con tassi di 2-3 millimetri per anno negli ultimi vent'anni, corrisponde esattamente all'area in cui sono avvenute tutte le eruzioni più recenti (*si veda l'illustrazione a p. 57*). Il sollevamento è concentrato in un settore bordato da due zone di faglia che limitano una porzione di crosta terrestre allungata in direzione nord-sud, che include i crateri di Ariccia (formatosi 200.000 anni fa), Nemi (150.000 anni fa), Valle Marciana (100.000 anni fa), Albano (due cicli, 69.000 e 41.000-36.000 anni fa), e il cono vulcanico di Monte Due Torri (formatosi 40.000 anni fa).

Questo permette dunque di ipotizzare che al di sotto dell'area dove sono avvenute le eruzioni più recenti si stia accumulando nuovo magma che provoca un «rigonfiamento» della superficie.

La rivalutazione di studi di tomografia sismica condotti in passato, ovvero una «scansione» della crosta terrestre effettuata usando le registrazioni di terremoti lontani che permettono di farne una sorta di radiografia ed evidenziare l'eventuale presenza di

Matteo Gabrieli/Shutterstock



Eric Vandeville/Getty Images

corpi ad alta temperatura, suggerisce che questa zona di accumulo possa essere tra 5 e 10 chilometri di profondità. Abbastanza profonda, quindi, da non destare preoccupazioni imminenti, ma comunque compatibile con la presenza di una camera di alimentazione magmatica.

Un'attesa di secoli

Un terzo importante elemento è emerso dagli studi che hanno investigato le cause dei lunghi periodi di inattività che hanno separato le diverse eruzioni ai Colli Albani. Si è infatti capito che la causa di questo comportamento peculiare, diverso dagli altri distretti vulcanici attivi nello stesso periodo di tempo nell'Italia centrale, sta nelle particolari condizioni geodinamiche dell'area di Roma, dove sono state attive forze crostali prevalentemente «compressive», rispetto a quelle «estensionali» delle aree circostanti. Questo stato di compressione orizzontale ha l'effetto di sigillare fratture e faglie che costituiscono le vie di risalita del magma durante le eruzioni. Quindi il magma rimane in profondità fino a quando il progressivo accumulo non genera pressioni che superano le forze compressive crostali. A questo punto si esercita una spinta verticale che riapre faglie e fratture: il campo di stress diventa cioè estensionale come nelle regioni circostanti, e un nuovo ciclo eruttivo ha inizio.

Studi di geologia strutturale effettuati alcuni anni fa da ricercatori dell'INGV hanno permesso di capire che l'inversione del campo di pressione, con il passaggio dallo stato di compressione allo stato estensionale attuale, è avvenuto non più di 2000 anni fa. Sono state infatti documentate deformazioni orizzontali di natura compressiva su un acquedotto romano del II secolo d.C., a testimonianza del fatto che fino ad allora in questa regione vigeva un campo di pressione nella crosta terrestre che impediva al magma di risalire verso la superficie.

Ma in qualche momento tra allora e oggi le cose sono cambiate. Al momento attuale gli indicatori geofisici indicano l'esistenza di un campo estensionale che tende ad allargare le fratture della crosta terrestre ai Colli Albani e nell'area romana, cioè compatibile con un sollevamento in atto e favorevole alla eventuale risalita di magma.

Non è possibile fare previsioni sui tempi in cui potrebbe avvenire una nuova eruzione, ma certamente ci vorranno secoli, e più probabilmente millenni, prima che il magma trovi una via di risalita fino alla superficie. Allo stato attuale dei fatti non ci sono prove di una camera magmatica vera e propria, e lo stesso sollevamento che si osserva nell'area dei crateri recenti potrebbe essere dovuto a fluidi e gas in pressione anziché all'accumulo di magma. Un nuovo studio di tomografia sismica e un modello al computer della sorgente della deformazione potranno chiarire se un corpo magmatico è davvero il responsabile del sollevamento in atto. A quel punto non resterebbe che mantenere l'area vulcanica sotto costante monitoraggio, in modo che i segnali di una futura eruzione posano essere eventualmente registrati per tempo dai nostri pronipoti. ■

PER APPROFONDIRE

L'attività recente del centro eruttivo di Albano tra scienza e mito: un'analisi critica del rapporto tra il vulcano laziale e la storia dell'area albana. D'Ambrosio E., Giaccio B., Lombardi L., Marra F., Rolfo M.F., Sposato A., atti del convegno *Lazio e Sabina*, sesto incontro di studi sul Lazio e la Sabina, pp. 125-136, Roma, 2010.

Assessing the volcanic hazard for Rome: 40Ar/39Ar and In-SAR constraints on the most recent eruptive activity and present-day uplift at Colli Albani Volcanic District. Marra F. e altri, in «Geophysical Research Letters», Vol. 43, n. 13, pp. 6898-6906, 16 luglio 2016. **doi:10.1002/2016GL069518.**

The Alban Hills and Monti Sabatini volcanic products used in ancient Roman masonry (Italy): an integrated stratigraphic, archaeological, environmental and geochemical approach. Marra F., Deocampo D., Jackson M.D., Ventura G., in «Earth-Science Reviews», Vol. 108, nn. 3-4, pp. 115-136, ottobre 2011. **doi:10.1016/j.earscirev.2011.06.005.**

Roma e la storia delle glaciazioni. Marra F., Florindo F., Boschi E., in «Le Scienze» n. 395, luglio 2001.

hello
bye
mommy
dadda
X
Why?
YES
NO
What?
X
Where's the...
Dog Ball

LINGUISTICA

UN NUOVO MODO DI VEDERE IL LINGUAGGIO

Gran parte della rivoluzione in linguistica operata da Noam Chomsky – compresa la spiegazione di come impariamo le lingue – è messa in discussione

di Paul Ibbotson e Michael Tomasello

L'idea che il nostro cervello sia intrinsecamente dotato di uno stampo mentale per l'apprendimento della grammatica – quella per cui è famoso Noam Chomsky, del Massachusetts Institute of Technology – ha dominato la linguistica per quasi mezzo secolo. Di recente però studiosi di scienze cognitive e linguisti hanno iniziato ad abbandonare in massa la teoria della «grammatica universale» di Chomsky, in seguito a nuove ricerche dedicate a molte lingue diverse e al modo in cui i bambini imparano a capire e parlare la lingua della propria comunità: ricerche che non confermano le asserzioni di Chomsky.

Questi studi suggeriscono una prospettiva radicalmente diversa, in cui l'apprendimento della prima lingua non si basa su un modulo grammaticale innato; i bambini usano invece vari tipi di pensiero che potrebbero non essere affatto specifici per il linguaggio, come la capacità di suddividere il mondo in categorie (persone o oggetti, per esempio) e quella di capire i rapporti fra le cose. Sono queste abilità, unite alla facoltà tutta umana di afferrare ciò che gli altri vogliono comunicare, a consentire che accada il linguaggio. I nuovi dati indicano che se i ricercatori intendono davvero capire in che modo i bambini, e non solo loro, imparano le lingue, devono guardare oltre la teoria di Chomsky.

È una conclusione importante, perché lo studio del linguaggio ha un ruolo centrale in parecchie discipline, dalla poesia all'intelligenza artificiale fino alla stessa linguistica; e una teoria errata produce metodi che danno risultati discutibili. In più, il linguaggio è usato dagli esseri umani in modi che nessun animale può eguagliare: se si capisce che cos'è il linguaggio, si capisce un po' meglio la natura umana.

Illustrazione di Owen Gildersleeve

La prima versione della teoria di Chomsky, avanzata a metà del XX secolo, si inscriveva in due grandi tendenze emergenti della vita intellettuale dell'occidente. In primo luogo postulava che la lingua della vita quotidiana si comportasse come i linguaggi a base matematica delle discipline informatiche allora emergenti. Il suo lavoro cercava la struttura computazionale sottostante al linguaggio, e proponeva un insieme di procedure che potessero creare frasi «ben formate». L'idea rivoluzionaria era che un programma simile a quelli dei computer potesse produrre frasi che i veri esseri umani ritenevano corrette. Il programma avrebbe anche spiegato il modo in cui la gente genera le frasi che dice.

Mentre sviluppava le sue teorie computazionali, Chomsky proponeva contemporaneamente che fossero radicate nella biologia umana. Nella seconda metà del XX secolo stava diventando sempre più chiaro che la nostra particolare storia evolutiva è responsabile di molti aspetti della nostra psicologia, e dunque la teoria era in sintonia con i tempi anche in questo. La sua grammatica universale era proposta come una componente innata della mente umana, e prometteva di rivelare le basi biologiche delle oltre 6000 lingue dell'umanità. Le teorie più potenti, e più belle, della scienza sono quelle che mostrano l'unità profonda nascosta sotto le differenze superficiali, per cui la sua ebbe subito successo.

Ma i dati hanno reso superata la teoria di Chomsky, avviata da anni a morte lenta. Lenta davvero, perché, come ebbe a notare il fisico Max Plank, i vecchi studiosi tendono a restare aggrappati alle vecchie abitudini: «La scienza avanza, un funerale alla volta».

In principio

Le prime incarnazioni della grammatica universale, negli anni sessanta, partirono dalla struttura sottostante alle lingue riunite in un gruppo detto «Lega linguistica europea», quelle parlate dalla maggior parte degli esperti coinvolti. Il programma della grammatica universale operava dunque su pezzi di discorso, come frasi nominali («il bravo cane») e frasi verbali («ama i gatti»).

Presto però cominciarono ad arrivare confronti linguistici con varie lingue che non rientravano in questo schema ordinato. Alcuni linguaggi dei nativi australiani, come il Warlpiri, hanno elementi grammaticali sparsi per tutta la proposizione – frasi nominali e verbali che non sono «ben confezionate» e dunque non si riusciva a inserire nella grammatica universale di Chomsky – e anche proposizioni del tutto prive di frasi verbali.

Questi cosiddetti *outlier* (casi anomali) linguistici erano difficili da riconciliare con la grammatica universale costruita a partire da esempi tratti dalle lingue europee. Altre eccezioni alla teoria di Chomsky sono arrivate dallo studio delle lingue dette «ergative», come il basco e l'urdu, in cui l'uso del soggetto della frase è assai diverso da quello di molte lingue europee, il che mette di nuovo in discussione l'idea di una grammatica universale.

Accanto al lavoro teorico sulla linguistica, negli anni ottanta queste osservazioni condussero Chomsky e i suoi seguaci a un'ampia revisione della nozione di grammatica universale. La nuova versione, detta teoria dei principi e dei parametri, metteva al posto dell'unica grammatica universale valida per tutte le lingue del mondo un insieme di principi «universali» che governano la struttura del linguaggio, manifestandosi poi in modi diversi nelle varie lingue. Un'analogia può essere questa: tutti nasciamo con la capacità di percepire lo stesso insieme base di sapori, che poi interagendo con la cultura, la storia e la geografia produce l'attuale varietà della gastronomia mondiale. Principi e parametri erano un po' l'analogo linguistico dei sapori di base, e interagivano con la cultura a dare l'attuale varietà delle lingue; e allo stesso tempo definivano l'insieme delle possibili lingue umane.

Paul Ibbotson è docente di sviluppo del linguaggio alla Open University, con sede nel Regno Unito.

Michael Tomasello è condirettore del Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia, in Germania.

Lingue come lo spagnolo (e l'italiano) formano frasi pienamente corrette senza bisogno di un soggetto distinto: *Tengo zapatos*, («ho scarpe»), per esempio in cui la persona che ha le scarpe, «io», è indicata non da una distinta parola ma dalla «o» alla fine del verbo. Chomsky sosteneva che una volta che un bambino abbia incontrato un certo numero di frasi di questo tipo, il suo cervello imposta su «acceso» un certo interruttore, che a quel punto indica che il soggetto si può omettere. Da allora saprà che può omettere il soggetto in tutte le sue frasi.

Il parametro «omissione del soggetto» si riteneva determinasse anche altri caratteri strutturali della lingua. Questa nozione dei principi universali si adatta ragionevolmente bene a molte lingue europee. Ma i dati sulle lingue non europee sono risultati poco in linea anche con questa versione rivista della teoria di Chomsky. Anzi, alla fine le ricerche che hanno cercato di identificare i parametri, come quello dell'omissione del soggetto, hanno condotto all'abbandono della seconda incarnazione della grammatica universale. Più di recente Chomsky e coautori hanno descritto una grammatica universale ridotta a un solo elemento costitutivo, detto ricorsività computazionale (anche se molti fautori della teoria continuano a preferire l'assunto che vi siano numerosi principi e parametri universali). Il nuovo aggiustamento consente di combinare un numero limitato di parole e regole per dar luogo a un numero illimitato di proposizioni.

Le possibilità sono illimitate per il modo in cui il procedimento ricorsivo inserisce una frase *all'interno di* un'altra frase dello stesso tipo. In italiano, per esempio, si possono inserire nuove frasi a destra («Giovanni spera che Maria sappia che Pietro mente») o in posizione centrale («Il ragazzo vide il gatto che inseguiva il cane, che abbaiò»). In teoria è possibile andare avanti a inzeppare que-

IN BREVE

Noam Chomsky giganteggia da decenni nel campo della linguistica, grazie soprattutto alla sua teoria della grammatica universale.
La sua idea che lo stampo mentale della grammatica sia intrinseco alla struttura del cervello è stata messa in discussione perché non sostenuta dagli studi sul campo delle varie lingue.
La teoria ha conosciuto diverse versioni successive, per rendere conto di eccezioni che ne contraddicono postulati originari, e ha rinunciato a molte delle sue ambizioni iniziali.
Le alternative all'idea della grammatica universale postulano che l'apprendimento infantile delle lingue si valga delle facoltà cognitive generali e della capacità di leggere le intenzioni altrui.

ste frasi all'infinito. In pratica però quando le frasi si impilano l'una sull'altra come in questi esempi la comprensione salta. Chomsky però pensava che questo non fosse legato al linguaggio in sé, ma fosse un limite della nostra memoria. Quel che più conta però è che Chomsky ha proposto che questa capacità ricorsiva sia ciò che separa il linguaggio da altri tipi di pensiero, come categorizzazione e percezione delle relazioni tra le cose. Di recente ha poi proposto anche che questa capacità sia insorta per una singola mutazione genica verificatasi tra 100.000 e 50.000 anni fa. Ma quando i linguisti sono andati a guardare le variazioni tra le lingue del mondo hanno trovato controesempi dell'affermazione che questo tipo di ricorsività sia una proprietà essenziale del linguaggio. Certe lingue – il Pirahã della regione amazzonica, per esempio – sembrano cavarsela senza ricorsività chomskiana.

Come tutte le teorie della linguistica, la grammatica universale di Chomsky è un esercizio di equilibrio. Deve essere abbastanza semplice da essere utile, cioè prevedere l'esistenza di qualcosa che non è già incluso nella teoria stessa, altrimenti sarebbe solo un elenco di fatti. Però non può neppure essere tanto semplice da non riuscire a chiarire cose che invece dovrebbe spiegare. Prendiamo l'idea di Chomsky che le frasi di tutte le lingue del mondo abbiano un «soggetto». Il problema è che il concetto di soggetto è più una «somiglianza di famiglia» fra un certo gruppo di elementi che una categoria chiara. C'è una trentina di caratteri grammaticali, all'incirca, che definisce le caratteristiche di un soggetto. Ogni particolare lingua avrà solo un sottoinsieme di questi caratteri, che spesso non si sovrappone a quello di altre lingue.

La macchina cerebrale innata di strutturazione delle frasi, secondo Chomsky, inserirebbe le parole negli spazi grammaticalmente appropriati – come *«nice»* (agg.) o *«dogs»* (sost.).

Chomsky ha tentato di definire gli elementi essenziali della «cassetta degli attrezzi» del linguaggio – il tipo di macchinario mentale che consente la produzione del linguaggio umano. Ai controesempi riportati, alcuni dei suoi sostenitori hanno replicato che il fatto che una certa lingua manchi di un certo attrezzo – della ricorsività, per esempio – non significa che questo non faccia parte della cassetta. Allo stesso modo, il mero fatto che una certa cultura manchi del sale come condimento non significa che il sapore salato non faccia parte del repertorio base. Solo che, purtroppo, questo modo di ragionare rende le proposte di Chomsky difficili da mettere alla prova nella pratica, fin quasi, talora, a non essere più passibili di falsificazione.

Campane a morto

Un difetto decisivo delle teorie di Chomsky è che, applicate all'apprendimento infantile del linguaggio, sostengono che i bambini siano equipaggiati fin dall'inizio della capacità di formare proposizioni mediante regole grammaticali astratte. Molte ricerche però mostrano ora che l'acquisizione del linguaggio non avviene così. I bambini piccoli cominciano invece imparando semplici modelli grammaticali e poi, gradualmente, intuiscono un po' alla volta le regole sottostanti.

All'inizio i bambini parlano usando solo costruzioni grammaticali concrete e semplici basate su specifici schemi verbali: «Dov'è X?»; «Voglio X»; «Questo è X»; «Io lo X-o»; «Mamma lo X-a»; «Facciamo X»; «Tirami X»; «X non c'è più»; «Siediti su X»; «Apri X»; «X qui»; «X è rotto». Poi, i bambini combinano queste prime forme in schemi più complessi, come «Dov'è l'X che mamma ha X-ato?».

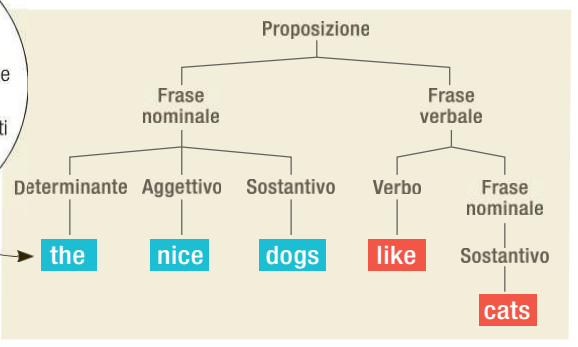
Molti dei proponenti della grammatica universale accettano questo modo di descrivere lo sviluppo iniziale della grammatica

Noam-enclatura

Oltre 50 anni fa Noam Chomsky rivoluzionò la linguistica. L'idea era semplice: sotto il linguaggio c'è un insieme di regole innate in ogni bambino, che genera frasi corrette fin dalla più tenera età. Chomsky si impegnò a definire quali siano e come funzionino queste regole. Senza una grammatica universale, pensava, sarebbe stato impossibile per i bambini imparare qualsiasi lingua. Negli anni successivi, la teoria di Chomsky è stata gradualmente posta in discussione da nuove teorie, secondo cui il linguaggio è acquisito man mano che i bambini individuano gli andamenti ricorrenti della lingua che sentono intorno a sé.

La grammatica universale di Chomsky

La grammatica universale di Chomsky equipaggiava il bambino con regole che operano sulle frasi (*«The nice dogs»*) e regole per trasformare quelle frasi (*«Cats are liked by the nice dogs»*). Negli ultimi anni la teoria si è evoluta, ma conserva l'idea centrale che i bambini nascono con la capacità di far sì che le parole si conformino a un modello grammaticale.



Apprendimento in base all'uso

Nuovi approcci suggeriscono che la capacità innata dei bambini di intuire il pensiero altrui, unita ai meccanismi di apprendimento del cervello in sviluppo, rendano meno necessaria una grammatica universale. Ascoltando, il bambino impara schemi d'uso applicabili a frasi diverse. La parola *«food»* (cibo) può sostituire *«ball»* (palla) dopo la frase: *«The dog wants»* (il cane vuole). Gli studi mostrano che questa teoria della costruzione della conoscenza del significato delle parole e della grammatica approssima bene il modo in cui imparano a parlare i bambini.

Illustrazione di Lucy Reading-Ikkanda

nei bambini. Ma poi assumono che quando emergono le costruzioni nuove e più complesse il nuovo stadio rifletta la maturazione di una capacità cognitiva che si vale della grammatica universale e dei relativi principi e categorie grammaticali astratti.

Gran parte degli approcci della grammatica universale, per esempio, postula che un bambino formuli una domanda seguendo una serie di regole basate su categorie grammaticali, come, in inglese «*What* (oggetto) *did* (ausiliare) *you* (soggetto) *lose* (verbo)?» [Cosa hai perduto?]. Risposta: «*I* (soggetto) *lost* (verbo) *something* (oggetto)» [Ho perso una cosa]. Se il postulato è valido, allora in una certa fase dello sviluppo i bambini dovrebbero fare sempre gli stessi errori in tutte le domande analoghe introdotte dalle cosiddette «parole [che cominciano per] wh» [cioè *what, who, where, when, why*, cosa, chi, dove, quando, perché]. Ma gli errori dei bambini non confermano questa predizione. Nei primi stadi di sviluppo, molti di loro fanno errori come «*Why he can't come?*» (Perché lui non può venire?) [corretto è «*Why can't he come?*»], ma allo stesso tempo formulano correttamente altre domande con «parole wh» e verbi ausiliari diversi, come «*What does he want?*» (Cosa vuole?).

Studi sperimentali confermano che i bambini producono più spesso frasi interrogative corrette quando usano certi verbi ausiliari e certe parole wh, pur continuando a fare errori in frasi interrogative che contengono altre combinazioni, spesso meno frequenti, di parole wh e verbi ausiliari, come «*Why he can't come?*» La principale risposta dei «grammatici universali» a queste osservazioni è che nei bambini la competenza grammaticale c'è ma altri fattori possono ostacolarne le prestazioni e quindi da un lato celare la vera natura della grammatica di cui sono in possesso e dall'altro rendere difficoltoso lo studio della grammatica «pura» postulata dalla linguistica chomskiana. Fra i fattori che mascherano la grammatica sottostante vi è l'immaturità della memoria, dell'attenzione e delle abilità sociali.

Però questa interpretazione del comportamento infantile non è l'unica possibile. Anziché mascherare la realtà vera della grammatica, memoria, attenzione e abilità sociali potrebbero essere gli elementi essenziali e primari della costruzione della lingua. Per esempio, un recente studio ha mostrato che la capacità dei bambini di produrre correttamente il passato remoto dei verbi irregolari – come in «*Every day I fly, yesterday I* flew» (e non «*flyed*») – era associata alla capacità di inibire una tendenza a dare certe risposte «spontanee» che non ha nulla a che fare con la grammatica (per esempio, dire la parola «Luna» di fronte a un'immagine del Sole). Memoria, analogie mentali, attenzione e ragionamento sulle situazioni sociali, insomma, invece di interferire con l'espressione da parte dei bambini della pura grammatica della linguistica chomskiana, potrebbero proprio essere le facoltà mentali che spiegano come mai il linguaggio si sviluppa così come fa.

Anche in questo caso, come negli altri citati in precedenza, l'idea che la prestazione mascheri la competenza è in gran parte impossibile da falsificare. Ma, anche al di là di queste difficoltà poste dai dati empirici all'ipotesi della grammatica universale, gli psicolinguisti che lavorano con i bambini fanno fatica a immaginare teoricamente un processo in cui i bambini partono tutti con le stesse regole algebrico-grammaticali buone per tutte le lingue e poi procedono a dedurre in che modo una certa lingua si ricollega allo schema generale. I linguisti parlano di «problema del collegamento», e uno dei rari tentativi sistematici di risolverlo nel contesto della teoria della grammatica universale è stato compiuto dallo psicologo Steven Pinker per i soggetti delle frasi. La versione di Pinker, però, è risultata in disaccordo con i dati degli studi sullo sviluppo infantile e non applicabile a categorie grammaticali diverse dal soggetto. Così il problema del collegamento – che dovrebbe essere quello centrale nell'applicazione della teoria della grammatica universale all'apprendimento del linguaggio – resta irrisolto, e anzi non è mai neppure stato affrontato seriamente.

Una prospettiva alternativa

Tutto questo conduce inevitabilmente a pensare che l'idea di grammatica universale sia sbagliata. Gli scienziati, naturalmente, non rinunciamo a una teoria favorita, anche dinanzi a prove contrarie, finché non compare una ragionevole alternativa. E un'alternativa, detta linguistica *usage-based*, o «orientata all'uso», oggi c'è.

La teoria, di cui esistono varie forme, sostiene che la struttura grammaticale non è innata. La grammatica è invece un prodotto della storia (i processi che decidono come le lingue vengono trasmesse da una generazione alla successiva) e della psicologia umana (l'insieme di facoltà cognitive e sociali che, comunque, consente alle generazioni di imparare una lingua). Soprattutto, questa teoria propone che il linguaggio recluti sistemi cerebrali che potrebbero anche non essersi evoluti specificamente per questo scopo, e dunque si differenza dall'idea di Chomsky di una mutazione a singolo gene per la ricorsività.

Secondo un nuovo approccio i bambini non nascono con uno strumento universale dedicato all'apprendimento della grammatica, ma ereditano l'equivalente mentale di un coltellino multifunzione

Nel nuovo approccio orientato all'uso (che accoglie idee provenienti dalla linguistica funzionale, da quella cognitiva, e dalla grammatica costruttivista), i bambini non nascono con uno strumento universale espressamente dedicato all'apprendimento della grammatica: ereditano invece l'equivalente mentale del coltellino svizzero multifunzione: un insieme di strumenti di uso generale – come categorizzare, leggere le intenzioni comunicative e porre analogie – mediante il quale costruiscono categorie e regole grammaticali a partire dalla lingua che sentono intorno a sé.

Per esempio un bambino di lingua italiana capisce «Il gatto mangiò il coniglio», e per analogia capisce anche ««La capra pizzicò la fata». Generalizza ascoltando un esempio dopo l'altro. A forza di esempi così potrebbe anche riuscire a indovinare chi fece cosa a chi nella frase «La galza mibbò il tommulo», benché contenga parole senza senso. La grammatica deve essere qualcosa che il bambino discerne al di là delle parole in sé, visto che a livello di parole fra queste frasi c'è ben poco di comune.

Il significato nella lingua emerge attraverso un'interazione tra i potenziali significati delle parole in sé (per esempio le varie cose che può significare la parola «mangiò») e il senso del costrutto grammaticale in cui sono inserite. Per esempio, anche se «starnutire» nel dizionario è un verbo intransitivo che prevede un unico attore (colui che starnutisce), forzandolo in una costruzione transitiva – con due complementi, uno diretto e uno indiretto – si potrebbe ottenere «la bambina starnutì il fazzoletto verso di lui», in cui «starnutire» viene costruito come un'azione di trasferimento

(fece arrivare il fazzoletto fino a lui). La frase mostra che la struttura grammaticale può dare al significato di un enunciato un contributo altrettanto forte di quello delle parole. Si confronti quest'idea con quella di Chomsky, che sosteneva che certi livelli della grammatica sono interamente privi di significati.

L'idea del coltellino multifunzione spiega inoltre l'apprendimento del linguaggio senza bisogno di invocare due fenomeni di cui ha bisogno la teoria della grammatica universale: da una parte una serie di regole algebriche con cui combinare i simboli – un nucleo di «grammatica lessicale» intrinseco al cervello – dall'altra un dizionario – una lista di eccezioni che comprende tutte le altre particolarità idiomatiche e le idiosincrasie delle lingue naturali, che deve essere appresa. Il problema di questo approccio duale è che certe costruzioni grammaticali sono basate su regole, ma solo in parte. Per esempio: «Lui, candidato alle presidenziali?», in cui il soggetto mantiene la forma di un complemento oggetto, ma le parole della frase non stanno nell'ordine giusto. Un italiano madrelingua può generare un'infinita varietà di frasi mediante lo stesso approccio: «Lei, in chiesa?», o «Quello lì, un chirurgo?». Dunque si pone la questione se questi enunciati facciano parte del nucleo grammaticale o della lista delle eccezioni. Se non fanno parte del primo, allora devono essere appresi a uno a uno e separatamente. Ma se i bambini possono imparare così questi enunciati, un po' regola e un po' eccezione, perché non possono imparare il resto della lingua allo stesso modo? In altre parole, che bisogno hanno di una grammatica universale?

Nei fatti, l'idea della grammatica universale è contraria alle prove che rivelano che i bambini imparano la lingua attraverso le interazioni sociali e si esercitano nelle costruzioni della frase elaborate dalle comunità linguistiche nel corso del tempo. In qualche caso abbiamo buoni dati su come esattamente si verifica questo apprendimento. Per esempio, le clausole relative sono piuttosto frequenti nelle lingue del mondo, e spesso derivano dall'unione di frasi separate. Così potremmo dire: «Mio fratello... Abita a Milano... Ama suonare il pianoforte». In seguito a vari meccanismi di elaborazione cognitiva, chiamati per esempio schematizzazione, abituazione, decontestualizzazione e automatizzazione, queste frasi si evolvono nei tempi lunghi in una costruzione più complessa: «Mio fratello, che abita a Milano, ama suonare il pianoforte». O, per esempio, una frase come «Ho tirato la porta, ed essa si è chiusa» potrebbe gradualmente diventare «Tirando la porta l'ho chiusa».

Per di più, a quanto pare noi siamo dotati di una facoltà speciespecifica di decodificare le intenzioni comunicative altrui: ciò che chi parla intende dire. In inglese, per esempio si può dire «*She gave/bequeathed/sent/loaned/sold the libray some books*» (ella diede/lasciò in eredità/inviò/prestò/vendette alla biblioteca dei libri) ma non «*She donated the library some books*» [corretto è: «*She donated some books to the library*» (Ella donò dei libri alla biblioteca)]. Recenti ricerche hanno mostrato che vi sono svariati meccanismi che conducono i bambini a limitare questo genere di analogie inappropriate. Per esempio, i bambini non traggono analogie prive di senso. Quindi non avrebbero mai la tentazione di dire «*She ate the library some books*» (ella mangiò dei libri alla biblioteca). Inoltre se i bambini sentono dire piuttosto spesso «*She donated some books to the library*», questo uso previene la tentazione di dire «*She donated the library some books*».

Questi meccanismi limitativi riducono molto l'insieme delle possibili analogie che un bambino può trarre, riportandole a quelle che si allineano alle intenzioni comunicative della persona che sta cercando di capire. È lo stesso tipo di lettura delle intenzioni che facciamo tutti quando interpretiamo «Puoi aprirmi quella porta?» come una richiesta d'aiuto e non di informazioni sulla nostra capacità di manovrare la porta.

Anche Chomsky ammette questo genere di «pragmatica» – il modo in cui la lingua è usata nel suo contesto – nella sua teoria generale del funzionamento del linguaggio. Data l'ambiguità delle lingue, non poteva non farlo. Ma sembra trattare il ruolo della pragmatica come periferico al compito essenziale della grammatica. In un certo senso, il contributo degli approcci orientati all'uso ha spostato il dibattito nella direzione opposta: fin dove può arrivare la pragmatica, nella lingua, prima che i locutori debbano rivolgersi alle regole della sintassi?

Le teorie orientate all'uso sono ben lontane dall'offrire un quadro completo di come funziona il linguaggio. Le generalizzazioni sensate che i bambini traggono dall'udire frasi ed enunciati non sono, per esempio, tutta la storia di come fanno i bambini a costruire le frasi: certe generalizzazioni sono sensate ma grammaticalmente scorrette («Egli sparì il coniglio», per esempio). Fra tutte le generalizzazioni sensate ma scorrette che potrebbero fare, quelle che i bambini effettivamente fanno sembrano molto poche. Il motivo, pare, è che sono sensibili al fatto che la comunità linguistica cui appartengono si conforma a una norma: per comunicare certe idee «si fa così». È un delicato equilibrio, comunque, visto che nel linguaggio infantile ci sono sia la creatività («ho prenduto la palla») sia l'adesione alla norma grammaticale («ho preso la palla»). I fautori delle teorie orientate all'uso hanno ancora molto lavoro da fare per spiegare come interagiscano queste forze nell'infanzia e chiarire esattamente il cammino che segue lo sviluppo del linguaggio.

Uno sguardo al futuro

Quando fu proposto, il paradigma chomskiano rappresentò una radicale rottura con gli approcci più informali dell'epoca e indirizzò l'attenzione verso i complessi aspetti cognitivi coinvolti nell'acquisire una competenza nel parlare e capire una lingua. Mentre ci aprivano gli occhi su cose nuove, però, le teorie come quella di Chomsky ci hanno reso ciechi ad altri aspetti del linguaggio. Molti ricercatori sono sempre più insoddisfatti di un approccio totalmente formale alla lingua come quello della grammatica universale – per non dire dell'inadeguatezza empirica della teoria. In più, molti dei ricercatori oggi diffidano dalle analisi teoriche astratte adesso che ci sono vaste raccolte di dati linguistici da analizzare per mettere alla prova le teorie.

Il mutamento di paradigma è di certo tutt'altro che completo, ma a molti pare che nel campo della linguistica sia arrivata una ventata d'aria fresca. Ci sono nuove, entusiasmanti scoperte da fare studiando i dettagli delle diverse lingue del mondo, le loro somiglianze e differenze, il modo in cui cambiano nella storia e quello in cui i bambini arrivano alla competenze in una o più di esse. La teoria della grammatica universale sembra arrivata al capolinea. Al suo posto, le ricerche della linguistica orientata all'uso possono essere una buona strada per avanzare nello studio empirico dell'apprendimento, dell'uso e dello sviluppo storico delle 6000 lingue esistenti al mondo. ■

PER APPROFONDIRE

Constructing a Language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition. Tomasello M., Harvard University Press, 2003.

Constructions at Work: The Nature of Generalization in Language. Goldberg A., Oxford University Press, 2006.

Language, Usage and Cognition. Bybee J., Cambridge University Press, 2010.

EVOLUZIONE

Speciazione in corso

Le orche si stanno separando in specie diverse, forse perché le differenze culturali tra le popolazioni le stanno allontanando

di Rüdiger Riesch

Rüdiger Riesch è docente di biologia evoluzionistica all'Università di Londra. La sua ricerca è dedicata ai meccanismi che creano, mantengono e limitano la biodiversità, con particolare attenzione alla speciazione che ha luogo quando una popolazione entra in una nuova nicchia ecologica.

A l largo delle spiagge di ciottoli di Bere Point, a Malcolm Island (nella provincia candese della British Columbia), la Naiad Explorer ondeggia dolcemente sulle acque dello stretto Queen Charlotte. Il sole ha scacciato gran parte della nebbia mattutina, tranne un piccolo strato che ancora aleggia sulle cime dei cedri e degli abeti dell'isola. Dalla barca osservo tre orche (*Orcinus orca*), tre fratelli – Cracroft, Plumper e Kaikash – che si strofinano placide sulle pietre lisce nelle acque basse a prua. È già un'ora che si dedicano a questa attività. Presto se ne andranno, a caccia di salmoni o alla ricerca di una compagna.

Perché queste creature si dedichino a questo sfregamento o «massaggio in spiaggia», non lo sappiamo. Secondo molti esperti aiuta a eliminare la pelle morta ed eventuali parassiti esterni, ma potrebbe anche essere per il solo piacere. Qualunque sia la motivazione, il massaggio – per quanto osservato raramente negli altri cetacei (il gruppo che include balene, delfini e focene: nonostante il nome, le orche in realtà sono grandi delfini) – qui è molto comune. È parte delle caratteristiche distintive della cultura delle orche settentrionali, una comunità che nei mesi estivi occupa le acque a nord dell'isola di Vancouver.

Le orche settentrionali non sono le uniche con comportamenti peculiari. Sin dagli anni settanta è stato osservato che ogni popolazione di orche nel mondo ha il proprio modo di fare le cose, dalla caccia alla comunicazione. Anche le caratteristiche fisiche, tra cui colori, dimensioni e forma delle pinne dorsali, variano tra i diversi gruppi, benché in maniera meno evidente. Queste differenze culturali e fisiche, insieme all'incredibile diversità genetica documentata negli ultimi 15 anni circa, secondo me e molti altri colleghi indicherebbero che le attuali popolazioni di orche, invece di essere un'unica specie come si è a lungo sostenuto, siano in corso di separazione lungo le proprie linee evolutive. Cioè, sembra che si stiano dividendo in nuove specie che, se il processo dovesse continuare, alla fine saranno incapaci di produrre prole vitale o fertile se incrociate.

In questo processo, è affascinante il ruolo di spinta alla diversificazione delle differenze culturali: le orche sembrano accoppiarsi con individui che condividono gli stessi comportamenti escludendo gli altri, e questa preferenza produce le condizioni necessarie alla speciazione. Se davvero fosse così, allora le orche sarebbero un esempio perfetto di un meccanismo di speciazione normalmente poco considerato nel classico modello di evoluzione di nuove specie. Potrebbero inoltre fornire nuove idee su come un altro gruppo di esseri viventi – *Homo sapiens* e i suoi antenati estinti – si sono diversificati in una serie di specie che nel passato hanno condiviso il pianeta.

Una diversità di orche

Per oltre un secolo i biologi hanno guardato alla geografia per spiegare come avviene la speciazione. Nello scenario adottato più comunemente – la cosiddetta speciazione allopatrica – due popolazioni di una specie ancestrale si separano fisicamente, spesso a causa di una barriera geografica di qualche tipo (una catena mon-

IN BREVE

I biologi evoluzionisti hanno spesso usato la geografia per spiegare l'emergere di nuove specie.
Nella spiegazione classica, due popolazioni di una stessa specie ancestrale vengono separate da una barriera geografica che ne impedisce l'incrocio, consentendo a ogni gruppo di seguire la propria traiettoria evolutiva.
Le popolazioni di orche, però, sembrano aver intrapreso cammini evolutivi separati, benché non vi siano barriere geografiche a dividerle.
Sempre più indizi suggeriscono che differenze culturali collegate alla dieta stanno progressivamente separando queste popolazioni.
Le scoperte sulle orche sollevano interrogativi sulla diversificazione in un altro gruppo di organismi capaci di produrre cultura: i membri della famiglia umana.

Pagine precedenti: Paul Nicklen/Getty Images

tuosa, un deserto, un fiume) che ne impedisce l'incrocio. Se questa separazione dura abbastanza a lungo, nel tempo ogni popolazione seguirà la sua traiettoria evolutiva, acquisendo diversi geni che possono aiutarla a sopravvivere nelle diverse condizioni ambientali, per esempio, o che si accumulano casualmente in un processo noto come deriva genetica. Alla fine, secondo questo modello, le due popolazioni possono diventare così diverse tra loro che se dovessero reincontrarsi non si potrebbero incrociare con successo.

Le prove che dimostrano che l'isolamento geografico aiuta effettivamente la speciazione sono numerosissime: dai gamberi pistoleri *Alpheus* che vivono sui due lati dell'istmo di Panama alle specie di pesci *Cyprinodon*, che si trovano nelle sorgenti isolate della California e del Nevada. Tuttavia ogni tanto due o più sottopopolazioni di aspetto diverso possono emergere all'interno della stessa area geografica e alla fine differenziarsi in specie differenti. Molti ricercatori, tra cui il famoso biologo evoluzionista tedesco Ernst Mayr, hanno tradizionalmente sostenuto che fosse necessario almeno un piccolo periodo di isolamento per il processo di speciazione, e che la speciazione nella stessa area fosse quindi impossibile, o almeno molto rara. Studi più recenti hanno però dimostrato che l'isolamento geografico non è sempre necessario perché abbia luogo la speciazione.

Non conosciamo barriere geografiche che possano impedire l'incrocio tra popolazioni diverse di orche

In effetti, ora molti biologi accettano che alcune specie, tra cui i pesci ciclidi incredibilmente vari che si trovano nei laghi vulcanici dell'Africa orientale e del Nicaragua, e le palme del genere *Howea*, dell'isola di Lord Howe, nel Pacifico, si sono evolute anche in assenza di quell'isolamento. Nel gergo dei biologi, hanno compiuto una speciazione simpatrica, e nel caso dei ciclidi sembra che ciò sia accaduto sotto la spinta dell'adattamento a fonti diverse di cibo (ma senza l'influenza della cultura), mentre le palme di Lord Howe hanno evoluto diversi ritmi di fioritura. Esempi documentati di speciazione simpatrica tra i mammiferi sono però rari, il che rende il caso delle orche particolarmente interessante.

Le orche sono i mammiferi con la più ampia distribuzione sul pianeta dopo gli esseri umani. Abitano tutti gli oceani, e possono viaggiare per 100 chilometri al giorno, mettendo insieme diverse migliaia di chilometri in poche settimane. Non conosciamo barriere geografiche che possano impedire a un individuo di una popolazione di mescolarsi con i membri di una popolazione vicina. Tuttavia è stato osservato che in diverse aree marine molte forme ecologicamente distinte di orche (gli ecotipi) possono vivere fianco a fianco senza fraternizzare. Un tipo, per esempio, può nutrirsi di un solo tipo di pesce, mentre un altro può preferire le foche.

L'insieme di ecotipi di orche più studiato vive nel Pacifico nord-orientale. Qui la ricerca ha preso il via nei primi anni settanta grazie al canadese Michael Bigg, e ha portato a risultati importanti. Per prima cosa Bigg notò che le singole orche differivano nella forma e nelle dimensioni delle pinne dorsali, e per la forma, la dimensione e la colorazione della cosiddetta sella, la macchia grigio-bianca dietro la pinna dorsale. È possibile quindi identificare singole orche, come le analisi forensi potrebbero usare i tratti del viso e le impronte digitali per identificare esseri umani.

In secondo luogo Bigg e i suoi colleghi – tra cui John K.B. Ford e Graeme M. Ellis di Fisheries and Oceans Canada, e Kenneth C. Balcomb III del Center for Whale Research dello Stato di Washington – hanno scoperto che nelle acque al largo della costa occidentale degli Stati Uniti e del Canada convivono tre diversi ecotipi di orca, le orche stanziali, transitanti e d'alto mare. Le stanziali sono specializzate nel mangiare pesce, in particolare salmoni; le transitanti cacciano invece mammiferi marini e ogni tanto anche qualche uccello; quelle d'alto mare sembrano invece specializzate in un altro tipo di dieta a base di pesce, che include halibut del Pacifico e squali dormienti (*Somniosidae*), ma le loro abitudini sono ancora misteriose, perché si incontrano raramente.

In anni recenti gli studi condotti da Olga A. Filatova, dell'Università Statale di Mosca, Alexander M. Burdin, dell'Accademia russa delle scienze, ed Erich Hoyt, di Whale and Dolphin Conservation, nel Regno Unito, hanno rivelato che ecotipi simili alle transitanti e alle stanziali condividono anche le acque russe del Pacifico nord-occidentale, intorno alla penisola della Kamchatka. Sappiamo quindi che c'è una fascia più o meno continua di popolazioni stanziali che coesistono con le popolazioni transitanti, fascia che connette il Pacifico nord-orientale e quello nord-occidentale, attraverso le isole Aleutine.

Dall'altra parte del mondo, le popolazioni di orche intorno a Islanda, isole Shetland e Norvegia, nell'Atlantico nord-orientale, hanno le loro preferenze alimentari. Le ricerche di Volker B. Deecke, dell'Università della Cumbria, nel Regno Unito, e Andrew D. Foote, dell'Università di Berna (tra gli altri), hanno osservato due gruppi: le orche di tipo 1 cacciano pesci, in particolare sgombri e aringhe, mentre quelle di tipo 2 vanno in cerca di foche. Ulteriori studi sono comunque necessari per capire le diversità alimentari tra i due gruppi.

Anche nell'emisfero australe si sovrappongono geograficamente diversi ecotipi. John W. Durban e Robert L. Pitman, della National Oceanic and Atmospheric Administration, e colleghi ne hanno scoperti almeno quattro nelle acque antartiche e sub-antartiche. Le orche di tipo A sembrano specializzate nella caccia alle balenottere minori (o rostrate), mentre le orche di tipo B hanno una forma più grande (le cosiddette orche della banchisa), che preferisce le foche, e una più piccola (l'orca di Gerlache) che cerca i pinguini. Il tipo C, l'orca più piccola che conosciamo, si ciba invece di merluzzi antartici (*Dissostichus mawsoni*). Da parte sua il tipo D, come le orche d'alto mare del Pacifico settentrionale, sembra vivere soprattutto in mare aperto, e rimane elusivo. Si sa che questo ecotipo si nutre di merluzzi della Patagonia (*Dissostichus eleginoides*) catturati nei palamiti, ma probabilmente ha anche altre prede.

Una volta riconosciuta la presenza tra le orche di tutti questi gruppi, ci si è iniziati a chiedere come hanno avuto origine. Hanno iniziato a differenziarsi mentre vivevano nella stessa regione o soltanto quando vivevano già separati e quindi hanno poi colonizzato la stessa regione dopo aver intrapreso cammini evolutivi distinti? Le informazioni disponibili non sono conclusive per ciò che riguarda le orche dell'emisfero settentrionale. Mentre molti studi di Foote e colleghi suggeriscono che la divergenza nel Pacifico settentrionale sia avvenuta mentre le popolazioni erano geograficamente isolate (speciazione allopatrica), altre analisi di Alan Rus Hoelzel della Durham University (nel Regno Unito) e colleghi indicano che questi ecotipi potrebbero essere coesistiti da sempre (speciazione simpatrica). Per le orche dell'Antartico, invece, le prove sono più chiare: gran parte di questi ecotipi, se non tutti, si sono differenziati simpatricamente mentre vivevano nella stessa regione.

Femmina

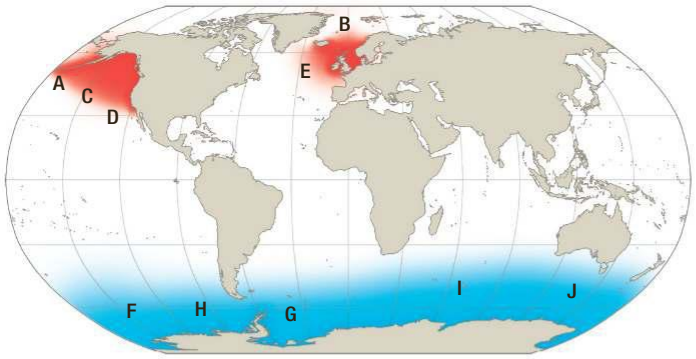
Maschio

A Residenti.
Preda preferita: pesci, soprattutto il salmone

Tipi di orche

Le orche vivono in tutti gli oceani del mondo, senza barriere geografiche che impediscano l'incrocio tra le diverse popolazioni. Le ricerche mostrano però che in diverse regioni si sono formati gruppi distinti, o ecotipi, nonostante vivano a stretto contatto. Questi gruppi separati, che non si incrociano, differiscono nella scelta delle prede e nel modo in cui cacciano. Si differenziano anche per caratteri fisici, come la dimensione, la colorazione, le macchie sugli occhi, la forma della pinna dorsale e della macchia dietro di essa. Le singole orche scelgono i partner sessuali tra quelle che condividono le loro abitudini e non tra gli individui di altri ecotipi. La cultura sembra tenere gli ecotipi separati, facilitando la speciazione.

B Tipo 1.
Preda preferita: aringhe e sgombri



F Tipo B (della banchisa).
Preda preferita: foche

H Tipo A.
Preda preferita: balenottere minori

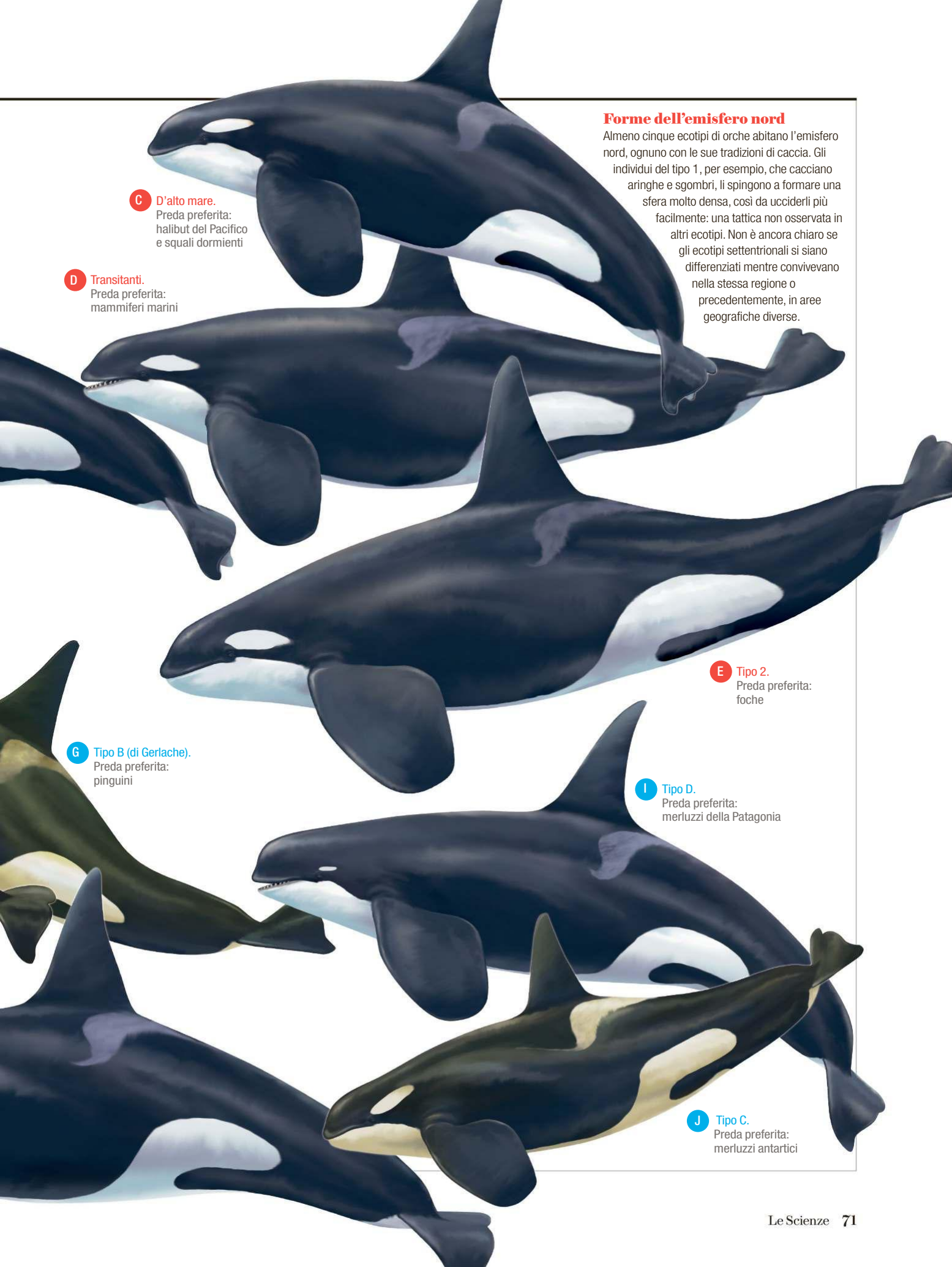
Forme dell'emisfero sud

Le acque antartiche e sub-antartiche ospitano almeno quattro ecotipi di orche. Le loro tradizioni culturali variano a seconda delle loro prede preferite. Per esempio i membri del tipo B dell'ecotipo della banchisa hanno sviluppato una strategia peculiare per spingere le foche giù dalle zattere di ghiaccio, così da catturarle più facilmente. Gli studi sul DNA indicano che la maggior parte di queste forme si sono differenziate mentre vivevano nella stessa area geografica.

Amadeo Bachar

Forme dell'emisfero nord

Almeno cinque ecotipi di orche abitano l'emisfero nord, ognuno con le sue tradizioni di caccia. Gli individui del tipo 1, per esempio, che cacciano aringhe e sgombri, li spingono a formare una sfera molto densa, così da ucciderli più facilmente: una tattica non osservata in altri ecotipi. Non è ancora chiaro se gli ecotipi settentrionali si siano differenziati mentre convivevano nella stessa regione o precedentemente, in aree geografiche diverse.



C D'alto mare.
Preda preferita:
halibut del Pacifico
e squali dormienti

D Transitanti.
Preda preferita:
mammiferi marini

E Tipo 2.
Preda preferita:
foche

G Tipo B (di Gerlache).
Preda preferita:
pinguini

I Tipo D.
Preda preferita:
merluzzi della Patagonia

J Tipo C.
Preda preferita:
merluzzi antartici

Una volta iniziata, la divergenza, simpatrica o allopatrica che fosse, è andata avanti rapidamente. Nel maggio scorso Foote e colleghi hanno pubblicato la loro analisi genomica di cinque ecotipi di orche del Pacifico settentrionale e dell'Antartico, mostrando che queste forme si sono evolute da un progenitore comune negli ultimi 250.000 anni. Che cosa le sta mantenendo separate? I dati sull'allevamento conservati e pubblicati di tanto in tanto dal parco marino SeaWorld, che ospita orche catturate sia nell'Atlantico settentrionale sia nel Pacifico settentrionale, dimostrano che l'accoppiamento tra i diversi ecotipi genera ancora una prole vitale e fertile, diversamente da muli e bardotti, generalmente infecondi, che nascono dall'ibridazione tra cavalli e asini. È quindi estremamente improbabile che siano incompatibilità genetiche tra gli ecotipi di orche a impedire l'incrocio tra le popolazioni naturali. Piuttosto, sempre più indizi puntano alle differenze culturali.

Scontro di culture

Come molti altri organismi che sono andati incontro a speciazione, le orche si sono diversificate sfruttando differenti fonti di cibo, evolvendo vari tratti che probabilmente le aiutano a ottenere quel cibo. Alcune di queste caratteristiche distintive sono fisiche, come la maggiore forza e dimensione delle orche che cacciano i mammiferi. Ma le specializzazioni più profonde hanno avuto luogo nei comportamenti culturali correlati alla ricerca di cibo. Poiché questi e altri comportamenti sono presenti solo in alcune popolazioni, in cui sembra che vengano trasmessi tra membri della stessa generazione e di generazione in generazione attraverso le interazioni sociali (il cosiddetto apprendimento sociale), anziché essere innati, i biologi li considerano culturali.

Le differenze più profonde tra le popolazioni si osservano nei comportamenti culturali legati alla ricerca del cibo

Per esempio le popolazioni di orche che cacciano i mammiferi marini hanno imparato a spiaggiarsi intenzionalmente per catturare i cuccioli inesperti di leoni marini e di elefanti di mare direttamente sulla spiaggia. Questo comportamento è stato osservato in due gruppi di orche diversi dai due ecotipi già citati. Uno abita le acque dell'arcipelago Crozet, nell'Oceano Indiano, tra l'Africa e l'Antartico; l'altro vive vicino alla Penisola Valdés, sulla costa atlantica dell'Argentina. A quanto sembra entrambe le popolazioni hanno inventato questa strategia di caccia indipendentemente, come conseguenza della loro scelta di prede e delle caratteristiche fisiche dei loro areali di caccia, dove canali di acque profonde e foci dei fiumi consentono alle orche di rimanere quasi del tutto sommerse fino a pochi metri dalla preda.

Nell'Antartico le grandi orche della banchisa del tipo B hanno inventato un'altra ingegnosa strategia per raggiungere le foche: il *wave washing*. Spesso le foche si issano su piccoli blocchi di ghiaccio galleggianti, dove si sentono al sicuro dai predatori. Ma le orche della banchisa hanno imparato a provocare delle onde che spazzano via le foche dal ghiaccio, facendole finire in acqua, dove sono più facili da catturare.

Le orche di tipo 1 delle acque islandesi e norvegesi, a dieta ittica, hanno invece sviluppato una strategia completamente differente per cacciare le aringhe, che sono la componente principale della loro dieta: la giostra. Un gruppo di orche circola intorno a un branco di aringhe spingendole a restringersi in una densa sfera vicino alla superficie, così che i pesci non possono scappare verso le acque più profonde. A questo punto le orche escono a turno dalla giostra per buttarsi in mezzo alle aringhe, sbattendo le pinne caudali per indebolirle e ucciderle.

Le orche comunicano persino in modo diverso a seconda di ciò che mangiano. È proprio nei loro segnali acustici che si trova la più incredibile diversità. Come altri delfini, usano tre diversi segnali acustici: click di ecolocazione, usati per navigare e localizzare le prede, richiami e fischi a impulsi, usati per comunicare con i loro compatrioti. Fischi e richiami differiscono non solo tra le orche di diverse regioni geografiche, ma anche tra popolazioni che abitano la stessa regione.

La ragione di questa variazione intraregionale nella produzione e nell'uso di segnali diventa chiara quando si considerano le diverse sfide fronteggiate dagli ecotipi. Le orche che cacciano i mammiferi marini, per esempio, devono confrontarsi con l'eccellente capacità uditiva sottomarina delle prede: grazie all'udito, le prede possono usare qualsiasi suono emesso dalle orche per individuarle e fuggire. Le orche transitanti del Pacifico nord-orientale e quelle che cacciano mammiferi nell'Atlantico settentrionale usano quindi i segnali acustici con molta parsimonia: il più delle volte nuotano e cacciano silenziosamente. Le orche a dieta ittica non hanno lo stesso problema, quindi in genere chiacchierano molto tra di loro e non lesinano sull'ecolocazione mentre nuotano e localizzano le prede.

Inoltre molti richiami a impulsi e, come mostrato da alcune mie ricerche, alcuni fischi, sono altamente stereotipati. I segnali, cioè, possono essere ulteriormente differenziati in suoni discreti, come le lettere di un alfabeto. (Non ci sono tuttavia prove che suggeriscano che le orche utilizzino questi segnali in un modo che somigli a come noi umani usiamo le parole e le frasi. Piuttosto, sembra che il significato di un segnale dipenda dal contesto in cui viene usato.) Questi suoni discreti esibiscono variazioni geografiche ed ecotipiche, ma variano spesso anche tra i diversi gruppi sociali all'interno di un ecotipo. Per esempio, tra le orche stanziali del Nord – una popolazione di orche a dieta ittica che abita le acque all'incirca dalla metà dell'isola di Vancouver fino al sud-est dell'Alaska – ogni unità familiare ha il proprio repertorio, che va da 7 a 17 diversi segnali. Le famiglie di orche che condividono una parte dei loro dialetti sono raggruppate in clan acustici: Clan A, Clan G e Clan R per le orche stanziali settentrionali.

I diversi tipi di richiami e dialetti familiari sono così distintivi che chi studia queste popolazioni di orche può assegnare gli individui al giusto ecotipo, clan o gruppo familiare in base alle registrazioni del loro repertorio di segnali. Queste differenze sono importanti nella scelta del partner sessuale. Le analisi genetiche delle orche stanziali settentrionali condotte da Lance Barrett-Lennard del Vancouver Aquarium Marine Science Centre hanno mostrato che la somiglianza dei richiami ricalca in gran parte la somiglianza genetica. Gran parte degli accoppiamenti avviene tra membri di clan diversi, cui corrispondono richiami diversi. La scoperta implica che le orche stanziali settentrionali trovino più attraenti le altre stanziali settentrionali che hanno suoni diversi rispetto a quelle con suoni più simili. I dialetti offrono quindi un buon modo per evitare l'incrocio tra consanguinei.

Il fatto che le orche abbiano tutta questa diversità di costumi tra gli ecotipi, e sembrino evitare di socializzare e accoppiarsi con stranieri di altri ecotipi benché siano biologicamente ca-

Un gruppo di orche risale in superficie al largo delle coste della British Columbia.

paci di farlo, suggerisce che la cultura stia mantenendo separati gli ecotipi. Alla fine, se la separazione persistesse per un numero sufficiente di generazioni, allora questi diversi ecotipi potrebbero evolvere altre differenze nel loro DNA, diventando geneticamente incompatibili. Nelle orche la cultura avrebbe quindi il potenziale di prendere il posto della separazione geografica nel facilitare la speciazione, ostacolando l'incrocio tra popolazioni.

Strade separate

Le scoperte sulle orche sollevano domande interessanti sulla diversificazione all'interno della famiglia umana. Tradizionalmente gli antropologi hanno considerato la maggior parte delle pressioni selettive che hanno influenzato la nostra evoluzione come il risultato di cambiamenti avvenuti esclusivamente nell'ambiente che ci circonda. Analisi genetiche recenti hanno però evidenziato che un'ampia parte della nostra evoluzione potrebbe essere stata il risultato di alcune innovazioni culturali, in alcuni casi molto limitate geograficamente.

La pratica dell'allevamento ha influenzato l'evoluzione della tolleranza al lattosio in alcune popolazioni europee e africane; la dieta ad alto contenuto di grassi degli Inuit della Groenlandia li ha portati a evolvere un metabolismo dei grassi più efficiente. Anche se tutte le moderne popolazioni umane appartengono chiaramente alla stessa specie e si mescolano normalmente tra loro, per gran parte della preistoria umana specie umane diverse hanno condiviso il pianeta. La cultura potrebbe aver avuto un ruolo importante nel guidare la speciazione tra i primi membri della famiglia umana?

Malgrado i fantastici progressi nella comprensione della diversificazione delle orche, c'è ancora molto da imparare. Ci sono altre regioni meno studiate che ospitano ecotipi simpatrici di orche? Alcuni studi, ancora all'inizio, sembrano indicare che ciò accada negli oceani che circondano l'Africa; e probabilmente anche in Sud America e in Asia meridionale. Inoltre, quali sono i sistemi di comunicazione delle orche antartiche e sub-antartiche, e quali sono le loro strutture sociali? Con l'avvento dei nuovi strumenti per lo studio del genoma, il futuro degli studi sulla speciazione in generale, e in particolare delle orche, sembra molto promettente. Forse in un tempo non troppo lontano queste e altre, nuove tecnologie ci consentiranno di determinare in modo inequivoco quale sia stata la distribuzione geografica delle popolazioni di orche durante tutte le fasi della loro diversificazione.

Sappiamo già che la cultura può dividere popolazioni di orche che vivono fianco a fianco. Forse tra pochi anni saremo in grado di riconoscere questi ecotipi come specie diverse, ognuna limitata a una specifica area geografica degli oceani, ognuna con i propri usi e la propria dieta, ognuna con il potenziale di diversificarsi e formare altre gemme sull'albero della vita. ■

PER APPROFONDIRE

Cultural Traditions and the Evolution of Reproductive Isolation: Ecological Speciation in Killer Whales? Riesch R. e altri, in «Biological Journal of the Linnean Society», Vol. 106, n. 1, pp. 1-17, maggio 2012.

Phylogenomics of the Killer Whale Indicates Ecotype Divergence in Sympatry. Moura A.E. e altri, in «Heredity», Vol. 114, n. 1, pp. 48-55, gennaio 2015.

Geographic and Temporal Dynamics of a Global Radiation and Diversification in the Killer Whale. Morin P. A. e altri, in «Molecular Ecology», Vol. 24, n. 15, pp. 3964- 3979, agosto 2015.

Hiroya Minakuchi/National Geographic Creative

Area in declino.
Veduta del canale industriale e commerciale di Porto Marghera, in provincia di Venezia, nei primi anni novanta. Da lungo tempo ormai questo polo industriale sta vivendo un lento declino.

Un oncologo italiano e le sue innovazioni nello studio sperimentale dei tumori sono stati cruciali per stabilire il legame tra una specifica molecola e i tanti casi di cancro tra gli operai di Porto Marghera

EPIDEMIOLOGIA

La prova del rischio

di Giulia Frezza e Mauro Capocci

Maurizio Maule/Fotogramma

Giulia Frezza ha ottenuto un PhD in filosofia della scienza (Università di Roma 3 e Université Paris Diderot-Paris 7) e un post-doc in filosofia e storia della medicina alla «Sapienza» Università di Roma. Ha in corso un progetto di ricerca sulla storia della medicina occupazionale e dell'epidemiologia in Italia.

Mauro Capocci è ricercatore nell'Unità di storia della medicina della «Sapienza» Università di Roma e si occupa soprattutto di storia delle scienze biomediche in Italia nel XX secolo. Per «Le Scienze» ha già pubblicato tre articoli: *Ricci, geni ed epigenetica* (agosto 2015), *La guerra fredda della penicillina* (aprile 2014) e *La rivoluzione mancata della biologia italiana* (novembre 2003).

Costruito tra il 1475 e il 1481, pochi chilometri a nord di Bologna lungo il canale Navile alimentato dalle acque del Reno, il castello di Bentivoglio, con la sua cinta merlata ricostruita nell'Ottocento, è un luogo incantevole: prati ben curati, poco traffico, il paese dall'altra parte della strada e i campi intorno. All'esterno, nulla fa sospettare che in quell'edificio di mattoni rossi, con il ponte levatoio e i giochi per i bambini nel prato, abbia sede un centro di ricerca biomedica all'avanguardia, che ha scritto un pezzo di storia della medicina.

Nei primi anni settanta, qui sono stati effettuati gli studi che hanno scoperto la cancerogenicità del cloruro di vinile monomero (CVM), la molecola resa tristemente famosa dal processo per la strage operaia del petrolchimico Montedison di Porto Marghera, vicino a Venezia. Nell'Istituto di oncologia da lui diretto e ospitato nel castello di Bentivoglio, Cesare Maltoni mostrò al mondo quanto l'industria chimica protagonista del nostro modello di sviluppo potesse essere pericolosa. Una storia scientifica di successo, dietro una tragedia del nostro tempo.

Uomini e topi tra rischi e prevenzione

Per quanto non sia un nome noto al grande pubblico, il CVM è la base per la produzione del cloruro di polivinile (PVC) di cui sono fatti molti oggetti della nostra vita quotidiana (tubi, pellicole, infissi e così via). Il processo industriale per la polimerizzazione del CVM è stato scoperto negli anni trenta, e da allora il PVC ha letteralmente invaso il pianeta.

In Italia era prodotto soprattutto negli stabilimenti Solvay di Rosignano, in Toscana, e Montedison di Marghera. Nel 1962 Pierluigi Viola, medico di fabbrica alla Solvay, notò due casi di acroosteolisi, una malattia delle ossa delle mani e dei piedi. Ulteriori ricerche mostrarono altri casi negli altri stabilimenti Solvay. Viola iniziò dunque un esperimento con i ratti, esponendo 26 animali a una concentrazione di CVM di 30.000 parti per milione (ppm). L'esito fu preoccupante: 17 tumori all'epitelio, 7 tumori ai polmoni, per lo più carcinomi, e 5 tumori alle cartilagine delle ossa. I risultati vennero resi noti a un congresso a Houston nel 1970, e ne ebbe notizia anche il direttore dell'Istituto oncologico «Felice Addarii» di Bologna, Cesare Maltoni. Nato nel 1930 a Faenza, oncologo laureato a Bologna, con importanti esperienze di ricerca a Parigi e a Chicago, Maltoni aveva da poco avviato una ricerca sperimentale sui lavoratori del settore chimico, per analizzare gli effetti dell'esposizione a differenti agenti sugli epiteli delle vie respiratorie. Chiese a Viola di vedere i campioni prelevati dagli animali e i dati ancora non pubblicati: la dose di 30.000 ppm, che evidenziava la cancerogenicità, era però molto alta, e non realistica.

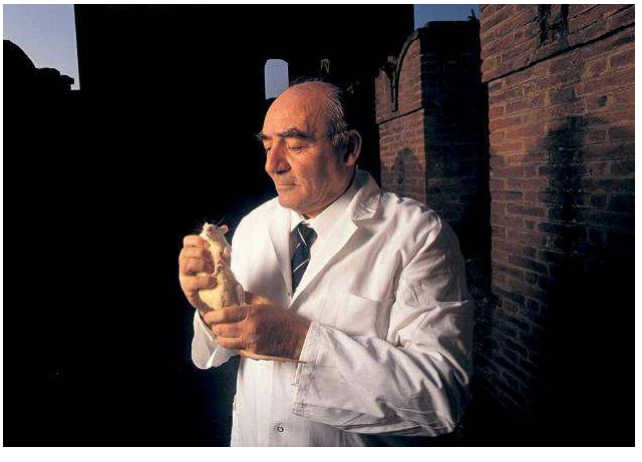
Tra fine 1970 e inizio 1971, avendo appreso i risultati di Viola, fu proprio Montedison a rivolgersi a Maltoni per avviare una ricerca approfondita per valutare la reale pericolosità del CVM. Maltoni ebbe l'occasione e i finanziamenti per mettere in pratica un nuovo modo di fare ricerca in questo campo. Si rese conto che uno dei problemi degli studi precedenti era l'assenza di modelli sperimentali affidabili, in grado di produrre prove inoppugnabili. Lo studio di Viola, per esempio, era statisticamente poco significativo, perché i numeri erano limitati e non simulava condizioni realistiche. D'altra parte gli studi sugli esseri umani avevano tempi troppo lunghi, e le condizioni sperimentali non erano controllabili.

Ci voleva qualcosa di diverso: grandi numeri, tempi dilatati e la possibilità di modulare in modo preciso le variabili in gioco. Tra il novembre 1970 e il maggio 1971 Maltoni pianificò gli esperimenti, e nelle officine di Montedison fu realizzato il macchinario adatto a soddisfare le necessità di questo nuovo approccio

IN BREVE

Il cloruro di vinile monomero (CVM) è al centro della vicenda umana e processuale di Porto Marghera: tumori da esposizione alla molecola nello stabilimento Montedison (poi EniChem).
Dietro al successo del processo c'è una storia scientifica: la cancerogenicità del CVM fu dimostrata nei primi anni settanta da Cesare Maltoni, il quale sviluppò un nuovo approccio sperimentale all'oncologia e i cui studi furono la base per redigere nuove norme di gestione del rischio sanitario occupazionale e ambientale.

Inquinamento da studiare. I fumi emessi dal petrolchimico di Marghera negli anni settanta. Sotto, Maltoni sulle mura del Castello di Bentivoglio, dove dal 1969 ha sede il Centro di ricerca sul cancro.



Cortesia archivio Istituto Ramazzini (*Maltoni*); Giorgio Lotti/Mondadori Portfolio (*Marghera*)

sperimentale all'oncologia. Si trattava di un dispositivo speciale che permetteva di sperimentare contemporaneamente su centinaia di animali gli effetti del CVM (o di qualsiasi altra sostanza), modulando contemporaneamente durata dell'esperimento, modalità di somministrazione (inalazione, ingestione, iniezione), numero di animali, concentrazione della molecola da testare e altri parametri fondamentali. Con questo nuovo strumento, tuttora visibile (ma non in uso) al castello di Bentivoglio, fu possibile dare il via a 15 esperimenti paralleli (inclusi i controlli).

Tra il 1971 e il 1974 diverse specie (ratti, topi e cavie), furono esposte a diverse concentrazioni di CVM, con trattamento alternato o continuo, e varie modalità di somministrazione. Furono i ratti il modello più usato: 5450 animali, dall'embrione all'adulto, furono testati per una media di 600 giorni, per un totale di oltre 3 milioni di giorni di esposizione. Furono raccolte oltre 100.000 sezioni istologiche. Gli esperimenti inoltre furono progettati secondo un piano sperimentale innovativo, in modo da evitare problemi legati al ritardo nell'insorgenza delle malattie rispetto all'esposizione alla sostanza: ogni animale era costantemente monitorato, ma l'esperimento sul singolo esemplare era interrotto solo alla morte spontanea, una caratteristica distintiva del metodo di lavoro di Maltoni.

L'esperimento confermò i rischi a cui erano esposti i lavoratori, dimostrando in particolare che l'inalazione di CVM causava un raro tumore del fegato, l'angiosarcoma, e che ogni specie testata era risultata suscettibile a questa specifica malattia. Questa neoplasia sarebbe dunque diventata il segno distintivo della nocività del cloruro di vinile: assente negli animali del gruppo di controllo cui non era somministrato il CVM, era invece rilevato nei soggetti esposti. Gli studi offrirono inoltre i primi dati che correlavano la dose con il rischio di malattie, indicando l'esistenza di una soglia di 250 ppm. Prima di allora, le normative europee e statunitensi prevedevano una soglia tollerabile di 500 ppm. Con il proseguire dell'esperimento ci si rese conto che anomalie patologiche apparivano anche a una concentrazione di 50 ppm: il che indicava che di fatto non esisteva una dose sicura, soprattutto in condizione di esposizione ripetuta.

Mentre era in corso l'esperimento, le maggiori industrie europee produttrici di CVM – Montedison, Imperial Chemical Industries (Retno Unito), Solvay (Belgio) e Rhone-Progil (Francia) – diedero vita al Gruppo cooperativo europeo per lo studio degli effetti biologici del CVM, in modo da scambiarsi dati relativi alla tossicità della sostanza. Al contempo però le aziende strinsero un patto per controllare la circolazione delle informazioni e coordinare le relative strategie da adottare sia dal punto di vista della produzione, cercando di limitare i rischi per i lavoratori, sia per evita-

Due catastrofi lunghe quarant'anni

La mattina del 26 settembre 1976 una nube tossica si sprigionò dopo un'esplosione allo stabilimento dell'ANIC (poi EniChem) di Manfredonia, in provincia di Foggia, rilasciando sulla cittadina pugliese tonnellate (dalle 10 alle 32, secondo le stime) di arsenico. I rischi per i lavoratori e per la popolazione furono minimizzati e nulla fu fatto per la protezione dei cittadini, salvo una sommaria bonifica dei terreni. Per decenni – grazie al ricatto occupazionale, come in molti altri luoghi, da Marghera a Taranto – l'impianto ha continuato indisturbato a sversare rifiuti tossici in mare o nel terreno della fabbrica.

Nonostante le inchieste da parte degli operai con il supporto di Medicina Democratica e dell'Istituto superiore di Sanità, le cui perizie registrarono un aumento anomalo di neoplasie, l'unico processo è finito nel 2011 senza condanne e l'eccesso di arsenico nel corpo dei cittadini fu persino attribuito all'eccessivo consumo di crostacei. Nel frattempo la zona industriale, bonificata solo parzialmente, è stata inserita nei nuovi piani regionali di sviluppo, pur in assenza di un'adeguata valutazione ambientale. Dopo decenni di mobilitazioni da parte dei comitati civici locali, nel 2015 è partito un progetto di epidemiologia partecipata, in collaborazione con il Consiglio nazionale delle ricerche e la onlus Epidemiologia & Prevenzione, i cui risultati preliminari indicano probabili effetti nocivi dell'inquinamento nell'area.

Due mesi prima, il 10 luglio 1976, un malfunzionamento nell'impianto dell'ICMESA di Meda, in Brianza, causò la perdita di una quantità imprecisata di diossina – estremamente tossica per tutti gli esseri viventi – spinta dal vento verso Seveso. L'allarme non venne dato per una settimana, e la popolazione lasciò l'area contaminata solo con molto ritardo. Dopo un aspro dibattito, ad alcune donne che durante la gravidanza erano state esposte alla diossina fu permesso di ricorrere all'aborto terapeutico, mentre le case dell'area più vicina all'ICMESA furono abbattute e lo strato di terreno più superficiale rimosso. Le scorie sono state sepolte in grandi vasche, e sull'area è stato creato il Bosco delle Querce. Givaudan, l'azienda svizzera proprietaria dell'ICMESA, ha risarcito i danni in seguito a un accordo con governo italiano e autorità locali, evitando conseguenze giudiziarie.

A più di quarant'anni, gli effetti dell'esposizione alla diossina sono ancora misurabili, anche se sembrano estinguersi: la mortalità per neoplasie è aumentata solo in modo limitato, ma sono stati osservati effetti sulla proporzione tra i sessi e sulla funzionalità tiroidea dei nuovi nati (secondo l'esposizione dei genitori, in particolare del padre). L'incidente di Seveso ha dato il nome alla prima Direttiva Europea in materia di prevenzione dei grandi rischi industriali, emanata nel 1982 e recepita in Italia solo nel 1988.

re possibili conseguenze per le aziende. Già nel novembre 1972 le aziende europee e statunitensi erano a conoscenza dei primi risultati dell'esperimento, comunicati da Maltoni, che mostravano un evidente grado di rischio da esposizione al CVM. Accettando di lavorare su committenza Montedison, Maltoni sembrava costretto in una sorta di patto con il diavolo, e di fatto la circolazione dei suoi risultati fu limitata. Pur non avendo un vero e proprio vincolo di segretezza, solo ad aprile 1973 presentò i dati sul CVM a un convegno a Bologna, che ebbe però scarsissima risonanza. L'anno successivo Maltoni rese noti adeguatamente i risultati in varie occasioni pubbliche.

Gli studi di Maltoni furono dunque la base scientifica per adottare le nuove norme di gestione del rischio sanitario occupazionale e ambientale. Ma soprattutto le pratiche che introdusse resero chiaro ciò che fino ad allora era stato ignorato: se ben condotti, gli esperimenti *in vivo* di cancerogenesi sugli animali potevano essere indicatori affidabili per valutare quantitativamente il rischio per gli esseri umani. In seguito ai risultati sugli animali furono infatti condotte indagini epidemiologiche sui lavoratori del petrolchimico di Marghera esposti al cloruro di vinile: in questo gruppo l'angiosarcoma del fegato – estremamente raro (si parla di circa 2 casi per 10 milioni di individui) – si presentava in numeri molto più alti rispetto al resto della popolazione. Sapendo che cosa andare a cercare, emersero i primi casi di morti per angiosarcoma epatico, prima negli Stati Uniti e poi in tutta Europa.

Grazie ai suoi ratti, Maltoni aveva dimostrato che era ragionevolmente possibile prevedere la pericolosità di una sostanza prima di mettere a rischio la salute pubblica in nome dello sviluppo industriale. I test di preproduzione sulla nocività dei composti, effettuati secondo i rigorosi standard introdotti anche grazie a Maltoni sono poi diventati parte integrante delle normative progressivamente introdotte in Europa e negli Stati Uniti. Nel tempo queste norme sono uscite dalle fabbriche per allargarsi a tutta la popolazione. Già le indagini sulla produzione del cloruro di vinile avevano evidenziato che gli scarichi degli impianti emettevano continuamente CVM: 20 chilogrammi all'ora di molecola venivano dispersi nell'aria di Rosignano, e nei dintorni della fabbrica Solvay la concentrazione di CVM nell'atmosfera era di 50 ppm. Il pericolo non riguardava quindi solo gli operai addetti al ciclo di produzione, ma tutti lavoratori della fabbrica e gli abitanti delle immediate vicinanze, spesso le famiglie degli stessi operai.

L'esperimento sugli animali per il CVM è continuato fino al 1983: oltre 7000 esemplari usati e più di 200.000 campioni istologici, numeri mai raggiunti da altri laboratori. Prima dell'era -omica (genomica, proteomica e così via), Maltoni prefigurava l'uso di *big data* da esplorare a caccia di risultati significativi.

Lo standard molto rigoroso dell'esperimento CVM fu poi applicato da Maltoni negli anni successivi ad altri composti. Il più noto è il benzene, una vicenda in cui Maltoni e i suoi colleghi si trovarono in una controversia ancora più aspra e con una controparte molto «decisa», l'industria petrolifera. Nel 1974 l'International Agency for Research on Cancer (IARC) non considerava ancora solide le prove della carcinogenicità di questo composto, il cui vasto uso nelle benzine lo aveva reso praticamente onnipresente. Secondo Maltoni era un problema di esperimenti non adeguati. Si mise quindi al lavoro anche su questa sostanza, con un esperimento iniziato nel 1976, e già nel 1977 la capacità del benzene di indurre diversi tipi di tumori fu presentata da Maltoni in diversi contesti scientifici.

Il paradosso italiano

Il primato scientifico di Maltoni ci porta però a riflettere su una sorta di «paradosso italiano». Da un lato abbiamo un gruppo di medici che da anni effettuano ricerche d'avanguardia per la salvaguardia della salute pubblica e occupazionale. Dall'altro un ritardo cronico nell'accettare e adottare standard di protezione adeguati. Rispetto al primo punto vanno ricordati i tanti igienisti, medici del lavoro, oncologi, spesso parte del mondo accademico, e medici di fabbrica ed epidemiologi che dagli anni cinquanta erano impegnati per migliorare le condizioni di lavoro e in alcuni casi iniziava-

Il nome della diossina. L'impianto dell'ICMESA di Meda negli settanta, triste protagonista di un grave incidente industriale avvenuto il 10 luglio 1976, quando in seguito a un'esplosione si sprigionò una nube tossica di diossina che investì il centro abitato di Seveso.

no a pensare alle conseguenze dello sviluppo industriale su tutta la popolazione. Ricordiamo per esempio Enrico Vigliani, attivo nelle dispute sull'uso e la pericolosità delle fibre di amianto. Direttore della Clinica del lavoro di Milano, Vigliani era inserito nel network internazionale di studiosi delle malattie da amianto nei lavoratori, ma sollevò anche il problema dei cittadini che respiravano l'aria inquinata delle città, dove le fibre di amianto delle ganasce dei freni delle auto potevano contaminare l'atmosfera.

Come in altri campi della ricerca biomedica, però, non ci fu una vera collaborazione tra i diversi gruppi di ricerca impegnati in questo ambito. D'altra parte, le prime battaglie per la salute dei lavoratori e in difesa dell'ambiente, fino alla seconda metà degli anni settanta, si scontrarono con una politica industriale – accettata dai sindacati – di monetizzazione del rischio: gli operai esposti a fattori di rischio ricevevano indennizzi salariali, senza tuttavia spingere le aziende a proteggere sistematicamente i lavoratori. Tutto quello che poteva mettere a rischio lo sviluppo industriale, come per esempio l'introduzione di misure contro l'inquinamento, non era ben visto né dall'industria né dai sindacati. Solo alla fine degli anni settanta questo paradigma andò in crisi, grazie agli sforzi di molti degli attori in gioco, tra cui ricordiamo l'associazione Medicina Democratica, istituita nel 1976 da Giulio Maccacaro proprio per dare supporto medico scientifico alle rivendicazioni per la «salute in fabbrica».

Living in a chemical world

L'epidemiologia occupazionale e ambientale, nelle sue diverse declinazioni, ha avuto un ruolo fondamentale nell'inquadrare la riflessione sul mondo che abbiamo costruito a partire dalla Rivoluzione industriale. A partire dalle proprie esperienze di oncologo, e sull'onda di una serie di input ricevuti da colleghi e amici, Cesare Maltoni chiarì come non fosse più possibile pensare a un mondo senza chimica industriale, con tutto quello che ne consegue. Nel 1985 a Bologna Maltoni organizzò un grande convegno internazionale dal titolo inequivocabile, *Living in a Chemical World*. Chiamando a raccolta medici e ricercatori internazionali, si discussero pratiche e teorie dell'epidemiologia e dell'oncologia messe al servizio della prevenzione per i lavoratori e tutti i cittadini.

Ripetuto con cadenza decennale, il convegno del 1985 è stato anche il primo grande evento pubblico di una delle più importanti eredità di Cesare Maltoni: il Collegium Ramazzini, un'accademia indipendente che riunisce 180 membri di tutto il mondo eletti nel campo dell'epidemiologia, fondata da Maltoni insieme al suo sodale per quasi quarant'anni, lo statunitense Irving J. Selikoff. Intitolato a Bernardino Ramazzini, medico di Carpi e padre putativo della medicina occupazionale già dalla fine del Seicento, il Collegium rappresenta un luogo di scambio e reciproco supporto per i suoi membri, quasi una camera di compensazione per le tante e diverse pressioni che i ricercatori in questo campo subiscono nel loro lavoro. Anche il centro oncologico sperimentale fondato da Maltoni è stato intitolato all'illustre carpigiano, e ora nel castello di Bentivoglio le attività di ricerca sono portate avanti dall'Istituto Ramazzini ONLUS con il Centro di ricerca sul cancro «Cesare Maltoni».

La vicenda scientifica di Maltoni, scomparso nel 2001, è dunque un mix di locale e globale: la vicenda del CVM e di Marghera, con tratti peculiari italiani, si connette a una dimensione mondiale che gli epidemiologi hanno faticato a raggiungere, ma che si è poi dimostrata ineludibile: le normative sulle protezione dagli agenti cancerogeni, come quelle varate nei paesi ricchi, non possono scaricare i costi sanitari sui cittadini di altri paesi, se non mantenendo vive pericolose diseguaglianze e mantenendo alti i rischi per la salute di tutti. ■

PER APPROFONDIRE

Carcinogenesis Bioassays And Protecting Public Health: Commemorating The Lifework Of Cesare Maltoni And Colleagues. Mehlman M. (*a cura*), in «Annals Of The New York Academy Of Sciences», Vol. 982, dicembre 2002.

Il virus del benessere. Luzzi S., Laterza, Roma-Bari, 2009.

Le donne di Seveso. Ferrara M., Editori Riuniti, Roma, 1977.

Keystone-France/Getty Images

Disintossicarsi a *ogni* costo

Speranza in polvere: alla Envision Recovery, in Costa Rica si preparano dosi di ibogaina per i pazienti. La sostanza è illegale negli Stati Uniti per i suoi effetti tossici.

L'ibogaina, una sostanza contro le dipendenze che alcuni ritengono più efficace del metadone, potrebbe curare più tossicodipendenti di qualsiasi altra terapia. Oppure ucciderli

di James Nestor

James Nestor, scrittore freelance, è autore di *Il respiro degli abissi. Un viaggio nel profondo* (EDT 2015).

1

Uno sciame di locuste vi riempie il campo visivo. Nubi minacciose coprono il soffitto della camera da letto. Fronte, petto e mani grondano di sudore. Non riuscite a respirare. I muri si piegano e si contorcono. Vi coprite gli occhi, ma la scena si ripete con la stessa iperrealistica intensità. Da qualche parte, un pubblico applaude. Le finestre della stanza si fondono nell'oscurità e appaiono cento televisori grandi come francobolli, che mostrano istanti della vostra infanzia: il testo di una canzone che avete ascoltato una volta alla radio quando avevate due anni, il colore dei calzini indossati per la vostra festa di compleanno all'asilo, il timbro della voce del nonno. Le immagini si fondono in una scena oscura, fatta di demoni, pugnali e legioni di diavoli. Volete fuggire, ma non potete. Non potete svegliarvi, non potete muovervi. Siete Shea Prueger, e siete bloccati qui per 48 ore.

«Non è un'esperienza che si ha voglia di ripetere», racconta. Mentre parla, Shea si dondola lentamente su una sedia di vimini nel giardino di una casa in Costa Rica, a circa 45 chilometri dalla capitale San José. La donna, 29 anni, viveva a New York, era una modella e si faceva di eroina. Oggi ricorda il tentativo disperato, cinque anni fa, di liberarsi della dipendenza da oppiacei con una sostanza psicoattiva chiamata ibogaina.

Aveva già provato metadone, suboxone, la Narcotici Anonimi e altre cure. Nulla aveva funzionato. Così nel 2011 ha trascorso due giorni sdraiata su un materasso nella stanza di una clinica clandestina in Guatemala, senza riuscire a muoversi, con una forte nausea e la mente persa nelle più oscure profondità dell'inferno. È rimasta sobria per nove mesi, ha avuto una ricaduta nel giugno 2012 e dice di non aver assunto narcotici da allora. «L'ibogaina – insiste – ha fatto per me ciò che nessun'altra cura era riuscita a fare».

Alcuni ex tossicodipendenti, e alcuni scienziati, sostengono che una dose di ibogaina, una sostanza derivata da un arbusto delle foreste pluviali chiamato *Tabernanthe iboga*, contiene molecole che possono resettare i centri del cervello coinvolti nelle dipendenze, liberando le persone dal desiderio compulsivo di assumere droga. La voce si è diffusa, e centinaia – se non migliaia – di persone si sono rivolte a cliniche dove si può ottenere la sostanza, soprattutto in Messico e in America centrale, perché è illegale negli Stati Uniti. Nel 2006 solo pochi centri nel mondo offrivano l'ibogaina; oggi, secondo alcune stime, sono 40. Gli operatori sanitari affermano che una dose può arginare tossicodipendenza e depressione in circa il 70 per cento dei casi.

Se è vero, il tasso di successo renderebbe l'ibogaina un rimedio necessario contro un problema in rapida espansione. Diverse ricerche mostrano che dal 2007 il numero di eroinomani negli Stati Uniti è raddoppiato, raggiungendo il milione di individui. E il maggior consumo di aghi ha purtroppo innescato una nuova impennata di infezioni da HIV. In complesso, secondo la National Survey on Drug Use and Health, nel 2014 circa 7,1 milioni di statunitensi avevano seri problemi di droga. Molti cercano aiuto, ma invano. Il 40-60 per cento dei pazienti curati per dipendenza da oppiacei, per esempio, ha una ricaduta. In circa l'80 per cento dei casi il paziente aveva smesso di assumere il metadone, la più comune terapia sostitutiva.

Chi promuove l'uso dell'ibogaina afferma che la sostanza funziona perché agisce contemporaneamente su più vie nervose, non

IN BREVE

Si dice che l'ibogaina, una sostanza derivata da un arbusto delle foreste pluviali, possa liberare i tossicodipendenti dal desiderio compulsivo ripristinando le vie neurali danneggiate.

Poiché la sostanza è illegale negli Stati Uniti – è stata messa in relazione con problemi cardiaci potenzialmente fatali – molti si rivolgono a cliniche estere.

Alcuni neuroscienziati ritengono che gli studi secondo cui l'ibogaina è meglio del metadone siano inaffidabili; altri cercano invece di farne una terapia autorizzata.

Tutte le fotografie di Juan Arredondo

2

Lunghe ore di delirio. Alla Envision, l'eroinomane Bryan Mallek attende impaziente la terapia con ibogaina (*a sinistra*); dopo oltre un giorno trascorso sotto gli effetti allucinogeni dell'ibogaina, riesce ad alzarsi dal letto (*sopra*).

solamente su una come le altre terapie. Sotto questa spinta, due aziende fondate da scienziati, di cui una finanziata in parte dal National Institute on Drug Abuse (NIDA), stanno sviluppando medicinali basati su derivati della sostanza.

Ma c'è un problema: l'ibogaina può uccidere chi la assume. È dunque proibita negli Stati Uniti, dove è stata inserita nella lista delle sostanze vietate anche per uso medico. Durante la terapia i pazienti soffrono spesso di aritmie cardiache che possono condurre all'arresto cardiaco e alla morte. Una serie di dati pubblicati lega l'ibogaina a 19 morti su 3500 cure somministrate tra il 1990 e il 2008. Il Royal College of Psychiatrists del Regno Unito stima un tasso di mortalità di un paziente su 300, perché non è certo che le cliniche clandestine come quella in Guatemala registrino tutti gli eventi avversi. Ricerche sugli animali indicano che, quando non uccide, la sostanza produce danni cerebrali permanenti. «Abbiamo bisogno dell'ibogaina? No, se ha una componente tossica», ha dichiarato Herbert Kleber, psichiatra del Columbia University Medical Center.

Ammonimenti che però non fanno cambiare idea a tossicomani disperati, traditi da metadone, psicoanalisi e altre cure. Molti considerano l'ibogaina – e annessi rischi di arresto cardiaco e danni cerebrali – come l'ultima, migliore, possibilità di recupero.

Un lungo, strano viaggio

L'ibogaina non ha debuttato nella farmaceutica come cura contro le dipendenze. In piccole quantità, circa 8 milligrammi, agisce come stimolante. Dal 1939 al 1970 una casa farmaceutica francese produsse in massa una compressa a base di ibogaina, chiamata Lambarène, come cura contro depressione, letargia e malattie infettive. Le proprietà stimolanti dell'ibogaina la resero popolare tra gli atleti, al punto che negli anni sessanta il Comitato olimpico internazionale ne bandì l'uso. Più o meno nello stesso periodo Howard Lotsof, un diciannovenne eroinomane, assunse ibogaina per i suoi effetti allucinogeni e disse ad altri tossicodipendenti che la sostanza aveva ridotto il suo desiderio compulsivo di assumere eroina. La voce si diffuse, e i tossicodipendenti iniziarono ad assumerne dosi sempre più alte, fino a 20 milligrammi per chilogrammo di peso corporeo, per combattere la tossicodipendenza. Nei tardi anni ottanta, studi sugli animali indicarono che la sostanza poteva alleviare i sintomi dell'astinenza. Fu così che aprirono le prime cliniche all'estero.

Shea Prueger sostiene con fervore l'uso dell'ibogaina. Dopo averne sperimentato di persona i poteri curativi nel 2011 ha iniziato a somministrarla ad altri tossicodipendenti. Oggi è l'amministratrice di Envision Recovery, una clinica dell'ibogaina a Puntarenas, in Costa Rica. Nel paese l'uso medicinale dell'ibogaina è illegale – ma la detenzione per uso personale sembra essere tollerata – e secondo Lex Kogan, il suo fondatore, la Envision non è autorizzata a operare come centro per la cura delle dipendenze. Malgrado ciò, ogni settimana Prueger e Kogan ospitano fino a mezza dozzina di pazienti che soffrono di dipendenza da alcolici, oppiacei, anfetamine e farmaci, in una casa di otto stanze in stile ranch appoggiata su una ripida scogliera in un quartiere di periferia, e circondata da una vegetazione lussureggiante. Il personale della clinica controlla i pazienti contro il sorgere di eventuali effetti collaterali. Kogan e Prueger non hanno alcuna formazione medica ufficiale.

Verso la fine di dicembre 2014 è arrivato alla clinica in cerca di aiuto Bryan Mallek, un ventinovenne magro e fragile di West Palm Beach, in Florida, che da 15 anni faceva uso di eroina e da sei mesi era passato al metadone. Aveva provato a disintossicarsi decine di volte. «Nulla ha mai funzionato», mi ha detto con voce debole e tremante. Quando l'ho intervistato, su un logoro divano di pelle nera nella sala riunioni della clinica, Mallek aveva appena superato la metà di un percorso di cura lungo 18 giorni. Per prepararsi all'assunzione di una dose elevata di ibogaina

ne aveva assunte piccole dosi allo scopo di testare la risposta del suo fisico alla sostanza e verificare l'insorgere di pericolose reazioni avverse. Una soluzione elettrolitica iniettata per mezzo di una fleboclisi inserita nel braccio destro lo aiutava a mantenere idratato il corpo, a digiuno di acqua e frutta. «[L'ibogaina] agisce sulla neurochimica del cervello, per questo so che funzionerà», ha detto. «Non sono quattro chiacchere con un analista».

Il giorno dopo Mallek era sdraiato su un grande letto matrimoniale. Non assumeva oppiacei da 12 ore e stava vivendo le prime fasi di una crisi d'astinenza, brividi e sudore. Nei due giorni precedenti un'infermiera gli aveva praticato un elettrocardiogramma per controllargli soprattutto il ritmo cardiaco. Quando un paziente assume l'ibogaina il suo ritmo cardiaco rallenta: è una delle ragioni per cui si ritiene che la sostanza sia così pericolosa. Monitorare attentamente le condizioni cardiache aiuta a individuare e curare eventuali aritmie. Dopo l'esame l'infermiera aveva dichiarato che il cuore di Mallek era sano e i suoi parametri vitali nella norma. Era pronto per ricevere la terapia. Shea Prueger si era avvicinata con un'unica capsula riempita con 200 milligrammi di ibogaina. Envision acquista la sostanza bianca in polvere da un contatto in Sudafrica, racconta Kogan, che riesce a farle attraversare la dogana dell'aeroporto in Costa Rica trasportandola dentro contenitori Tupperware: non è mai stato fermato. Mallek ha mandato giù la pastiglia, ha poggiato la testa sul cuscino, ha chiuso gli occhi e si è preparato a due giorni di allucinazioni. «Sono qui e sono pronto – ha detto, la voce ridotta a un tremito – andiamo».

1

Kogan sostiene che negli ultimi cinque anni la Envision ha curato oltre mille tossicodipendenti. Come Mallek, queste persone ricevono inizialmente piccole dosi per individuare problemi come aritmie cardiache, seguite dalla dose elevata destinata a interrompere la dipendenza. Kogan e Prueger hanno tenuto traccia dei progressi dei pazienti per mesi, addirittura per anni, a mezzo di telefonate e messaggi di posta elettronica, e sostengono che questo regime può curare il 75 per cento delle persone che arrivano alla clinica.

Dichiarazioni che suonano bene ma non hanno un solido supporto scientifico, sostiene Luis Eduardo Sandí Esquivel, direttore dell'Istituto sull'alcolismo e la tossicodipendenza del Costa Rica, l'agenzia governativa che autorizza i centri per la cura delle tossicodipendenze. Le cliniche che offrono ibogaina sfruttano persone vulnerabili, accusa. Gli operatori costruiscono rituali mistici attorno alla sostanza e dicono ai tossicodipendenti che «l'ibogaina resetta il cervello e rimuove la tossicodipendenza. E quindi, certo, le persone pagano cifre enormi di fronte a un'offerta così magica e allettante, ma è tutto ben lontano dalla realtà». Sandí racconta di ricevere segnalazioni di gravi complicazioni mediche e ricadute che inducono la gente a tornare, anche se la sua agenzia non ha il potere legale di agire in merito. «Penso che [le cliniche] si appellino alla sofferenza e al dolore dell'essere umano, e offrano soluzioni magiche. È una manipolazione».

Alcune ricerche indipendenti supportano invece l'uso terapeutico dell'ibogaina. In uno studio del novembre 2014 Eduardo Schenberg, neuroscienziato dell'Università di São Paulo, in Brasile, ha studiato la storia clinica di 75 tossicodipendenti un anno dopo l'assunzione di una massiccia dose di ibogaina. (Schenberg racconta di aver condotto interviste telefoniche, cercando conferma dei dati raccolti dai medici che eseguivano controlli periodici sui pazienti).

Il suo studio ha rilevato che circa il 39 per cento era ricaduto nell'uso di stupefacenti e chi era stato sottoposto a un unico trattamento rimaneva libero dalla droga in media per 5,5 mesi. Questo potrebbe indicare un miglioramento rispetto al metadone: l'80 per cento dei pazienti in cura con il metadone ricade nell'uso di droga se interrompe il trattamento. Inoltre lo studio di Schenberg ha trovato che nei tossicomani che ricevevano dosi multiple di ibogaina l'astinenza era più lunga: in media 8,4 mesi.

L'antropologo medico Thomas Kingsley Brown ha condotto uno studio, non pubblicato, in cui ha seguito 30 tossicodipendenti cronici per un anno dopo l'assunzione di ibogaina in due cliniche in Messico. Brown, che lavora con la Multidisciplinary Association of Psychedelic Studies, in California, ha chiamato i pazienti con cadenza mensile e chiesto loro di compilare un questionario chiamato Addiction Severity Index, che misura i progressi in diverse aree problematiche comunemente legate alle tossicodipendenze, per esempio il benessere psichico e sociale. Due terzi dei pazienti hanno raggiunto metà dello studio prima di abbandonare; un terzo ha completato tutti e 12 i mesi.

I dati preliminari hanno mostrato che tutti i pazienti hanno beneficiato di quella che Brown chiama «una forte riduzione dei sintomi dell'astinenza». Chi ha completato l'anno ha migliorato significativamente il proprio benessere sociale. Lo studio non li ha seguiti oltre, quindi Brown non sa quanti, eventualmente, siano ricaduti nell'uso di stupefacenti.

Nonostante l'opinione negativa di Mallek sulla psicoterapia, Brown ritiene che l'ibogaina non possa funzionare senza il suo contributo. L'assistenza psicologica aiuta i pazienti a identificare le cause della dipendenza, come traumi psicologici o dolore fisico,

Timori per il cuore. Infermiere della Envision controllano che il ritmo cardiaco di Mallek non mostri anomalie (*a fronte*), un effetto collaterale noto e potenzialmente fatale dell'ibogaina. Durante la cura il personale lo tiene collegato a un monitor cardiaco (*sotto*).

2

mentre l'ibogaina interrompe il desiderio fisico e allevia i sintomi dell'astinenza. Secondo Brown questo doppio effetto può «rafforzare enormemente la determinazione delle persone a vivere di nuovo una vita onesta e sobria».

Quali i pericoli?

Nessun tossicodipendente potrà mai condurre una vita decorosa se viene ucciso dall'ibogaina. I rischi per il cuore sono ben documentati. Anche il cervello è potenzialmente in pericolo. Negli anni novanta, vari studi su animali condotti alla John Hopkins University mostrarono importanti lesioni cerebrali e la degenerazione delle cellule di Purkinje cerebellari – grandi neuroni che controllano diversi aspetti delle funzioni motorie – in ratti a cui era stata somministrata una dose di circa 100 milligrammi per chilogrammo di peso (mg/kg) di ibogaina, equivalente a una dose umana di circa 16 mg/kg. Nel 1996 uno studio della Environmental Protection Agency mostrò inoltre un considerevole aumento della proteina fibrillare acida della glia (GFAP), che può indebolire la struttura del cervello e le cellule del midollo spinale, in certe regioni dell'encefalo di ratti cui erano stati somministrati 100 mg/kg della sostanza: fino al 215 per cento nel tronco encefalico e fino al 142 per cento nel corpo striato. (Non sono stati osservati effetti sul cervelletto.)

L'estensione dei danni alle cellule di Purkinje e gli eventuali picchi della GFAP sembrano legati al dosaggio. Quando ricercatori dell'Albany Medical College hanno somministrato dosi di 40 mg/kg a ratti dipendenti da oppiacei (circa 6,5 mg/kg in un essere umano di medie dimensioni; la forte dose assunta da Mallek era di circa 8 mg/kg), non è stata osservata nessuna degenerazione evidente delle cellule di Purkinje. In uno studio dell'Università dell'Arkansas e del National Center for Toxicological Research, a un gruppo di ratti è stata somministrata ripetutamente una dose più bassa, a livelli di 25 mg/kg oltre dieci volte al mese, senza che si osservassero segni di neurotossicità. Nelle persone, dosi più basse (di appena 4,5 mg/kg) si sono rivelate fatali in un caso confermato. La classificazione restrittiva dell'ibogaina e la mancanza di risorse finanziarie hanno impedito di condurre studi clinici di tossicità sull'uomo per capirne le ragioni.

Nel 1993 Deborah Mash, neurofarmacologa alla scuola di medicina dell'Università di Miami, ottenne l'approvazione della Food and Drug Administration (FDA) per iniziare uno studio sulla sicurezza dell'ibogaina su volontari dipendenti dalla cocaina. I primi risultati furono positivi: le dosi iniziali di 1 e 2 mg/kg non fecero male a nessuno. Ma quando Mash chiese al NIDA nuovi fondi per condurre ricerche con dosi più elevate e iniziare uno studio di più vasta portata, che comprendeva indagini sulla sicurezza della sostanza, la misura del tempo impiegato dai pazienti a metabolizzarla e determinare se la genetica influenzasse il risultato, l'istituto rifiutò, sostenendo che l'ibogaina era troppo imprevedibile per essere usata in studi sull'uomo.

«È l'incubo dei farmacologi», ha dichiarato Frank Vocci, ex direttore per la ricerca sull'abuso di droghe alla FDA, che ha supervisionato gli studi al NIDA negli anni novanta. Secondo Vocci, uno dei problemi principali con questa sostanza è la difficoltà di stimare quale dose abbia effetti prevedibili sulla popolazione. «Abbiamo analizzato gli studi [esistenti] e scoperto qualcosa come due morti su 100 persone che avevano assunto ibogaina», ha detto Vocci. «Non è possibile svolgere uno studio con questo tipo di rischio. I dati sulla sicurezza sono semplicemente pessimi».

Nonostante i dubbi del NIDA, Mash riteneva però che i primi risultati ottenuti fossero interessanti. Finanziata da investitori privati e dagli stessi pazienti, tra il 1996 e il 2004 ha quindi continuato le ricerche su metabolismo, sicurezza ed efficacia della sostanza su oltre 300 tossicodipendenti cronici in una clinica dell'isola caraibica di Saint Kitts. Mash ha riferito che, secondo i dati raccolti nel periodo successivo alla cura, la disintossicazione a base di ibogaina ha bloccato almeno il 90 per cento dei sintomi dell'astinenza da oppiacei negli eroinomani cronici. Secondo le interviste ai familiari, oltre metà dei pazienti è rimasto «pulito» per un anno dopo la terapia.

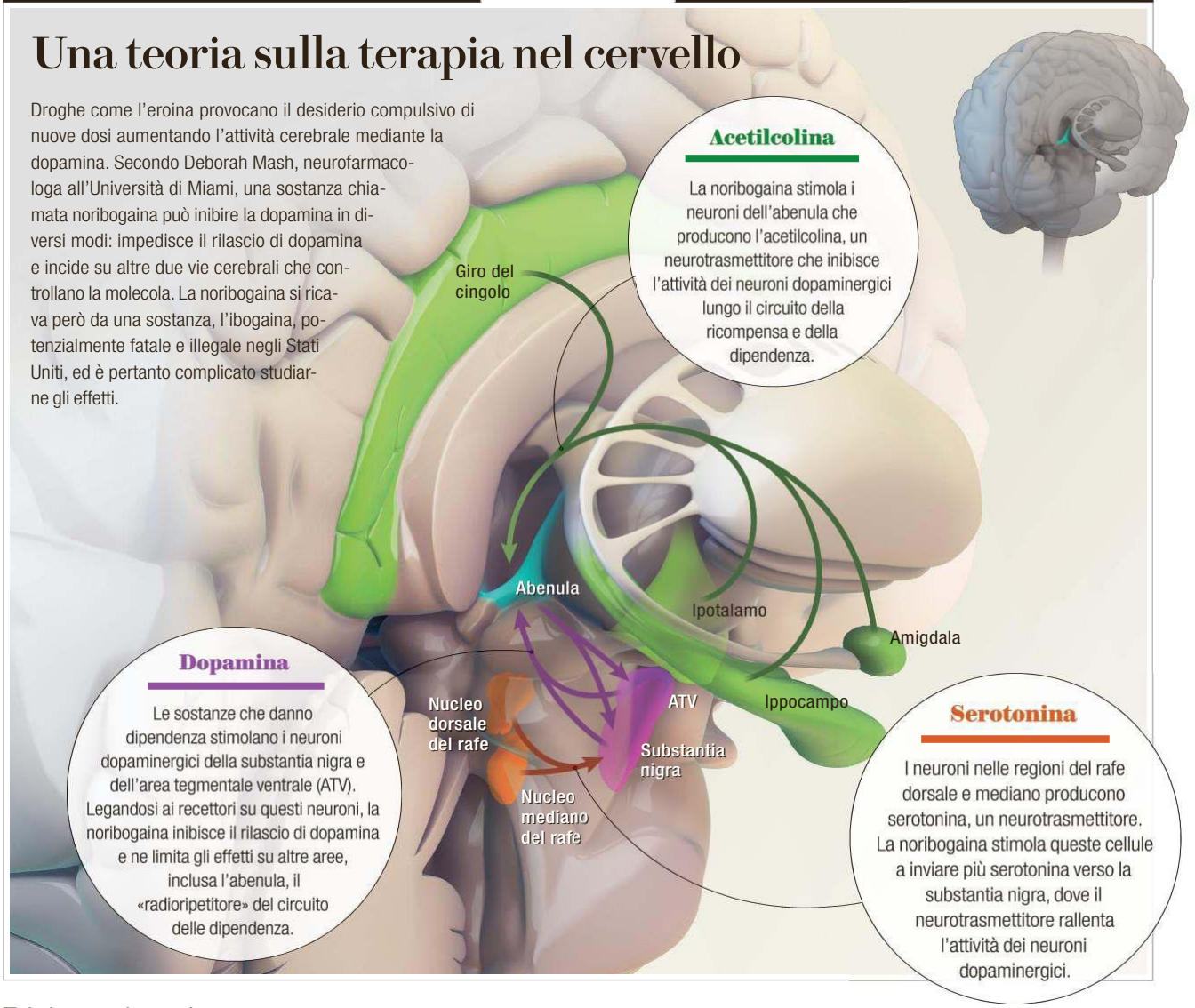
Le ricerche hanno permesso a Deborah Mash di sviluppare una teoria su come l'ibogaina agisce nel cervello e su che cosa, a suo avviso renda questa sostanza così potente. Dal punto di vista molecolare, tutti i momenti di euforia – gioia, gratificazione ed eccitamento sessuale – sono la conseguenza di dopamina, serotonina e altre sostanze, neurotrasmettitori, che trasmettono segnali attraverso miliardi di cellule nervose nei centri cerebrali della ricompensa. Più neurotrasmettitori di questo tipo sono attivi nelle aree della ricompensa, meglio si sta. L'introduzione nel corpo di un forte oppioide come l'eroina induce in queste aree un rilascio di dopamina e di altri neurotrasmettitori, scatenando l'euforia indotta dalla droga. Se si continua ad assumere eroina, il cervello si abitua alla sua presenza costante e i circuiti cerebrali nei centri della ricompensa si adattano. Se si interrompe l'assunzione, il corpo e il cervello iniziano a desiderare le sostanze, e il risultato sono le crisi di astinenza.

L'ibogaina funziona, sostiene la ricercatrice, perché non si sostituisce semplicemente all'eroina in una di queste vie neurali, come fa, per esempio, il metadone. Nel corpo, l'ibogaina si scinde in noribogaina, che influisce su diversi percorsi nervosi – tra cui il sistema della dopamina, e i circuiti che coinvolgono neurotrasmettitori come serotonina e acetilcolina – che interagiscono lasciando passare o bloccando i segnali associati al desiderio compulsivo della sostanza stupefacente (*si veda il box a p. 86*).

Ma senza nuovi fondi Mash non ha potuto verificare o approfondire il lavoro preliminare.

Una teoria sulla terapia nel cervello

Droghe come l'eroina provocano il desiderio compulsivo di nuove dosi aumentando l'attività cerebrale mediante la dopamina. Secondo Deborah Mash, neurofarmacologa all'Università di Miami, una sostanza chiamata noribogaina può inibire la dopamina in diversi modi: impedisce il rilascio di dopamina e incide su altre due vie cerebrali che controllano la molecola. La noribogaina si ricava però da una sostanza, l'ibogaina, potenzialmente fatale e illegale negli Stati Uniti, ed è pertanto complicato studiarne gli effetti.



Disintossicarsi

Per Stanley Glick, se l'ibogaina avesse meno effetti collaterali sarebbe molto più semplice bilanciarne costi e benefici. Glick, professore emerito presso il Dipartimento di neuroscienze e terapeutica sperimentale all'Albany Medical Center, sentì parlare per la prima volta del potenziale della sostanza e dei suoi rischi negli anni novanta. Insieme al chimico Martin E. Kuehne iniziò a distillare i principi attivi dell'ibogaina escludendo tutte le componenti tossiche. Nel 1996 Glick e Kuehne svilupparono un analogo sintetico dell'ibogaina chiamato 18-metossi-coronaridina, o 18-MC. Ricerche su animali da laboratorio svolte negli anni novanta hanno mostrato che la 18-MC blocca effettivamente i recettori nicotinici alfa-3 e beta-4 nel cervello, che si ritiene abbiano un ruolo significativo nelle dipendenze, senza incidere sul sistema serotoninergico. I ricercatori ritengono che il sistema serotoninergico sia largamente responsabile per le allucinazioni da ibogaina. «Congela qualunque cosa alzi troppo i livelli di dopamina», afferma Glick: dall'eroina all'alcool al cibo.

Negli ultimi dieci anni Glick ha diretto diversi studi sull'efficacia dell'ibogaina e della 18-MC contro le tossicodipendenze nei roditori e nell'essere umano. Dopo un paio di tentativi falliti di immettere la 18-MC sul mercato, nel 2009 si è messo in società con la Savant HWP, una casa farmaceutica privata con sede nella California settentrionale. Nel settembre 2014 la Savant HWP ha ricevuto dal NIDA oltre 6,5 milioni di dollari per testare la 18-MC sull'uomo. I risultati non pubblicati di uno studio in doppio cieco, controllato verso placebo, svolto nel 2014 in Brasile da una società partner della Savant HWP, mostrano che nessun volontario a cui era stata somministrata una dose terapeutica di 18-MC ha manifestato reazioni avverse alla sostanza: allucinazioni, anomalie cardiache, danni alle cellule di Purkinje o altre forme di neurotossicità. La Savant HWP ha in programma per il tardo 2016 trial clinici della 18-MC su fumatori. Studi su dipendenti da oppiacei e cocaina inizieranno negli Stati Uniti nel 2017.

Mash non è rimasta indietro. Ispirata dai risultati ottenuti in otto anni di test sull'ibogaina condotti a Saint Kitts, ha partecipato alla fondazione di DemeRx, un'azienda per la ricerca e lo sviluppo farmaceutico che opera per portare sul mercato la noribogaina, un altro derivato dell'ibogaina. Nell'ottobre 2014 un gruppo di scienziati neozelandesi, basandosi sul lavoro dell'azienda, ha completato uno studio sulla sicurezza della noribogaina su 36 volontari maschi non affetti da dipendenze. I volontari hanno ricevuto per

Fonti: *Deborah Mash: The Role of the Habenula in Drug Addiction*, di Kenia M. Velasquez et al., in «Frontiers in Human Neuroscience», Vol. 8, 28 marzo, 2014

Sostenitori: Shea Prueger (*a sinistra*) e Lex Kogan (*a destra*) gestiscono la clinica Envision. Ritengono che l'ibogaina non risolva solo le dipendenze ma anche la depressione, e curano pazienti per entrambi i problemi.

via orale varie dosi terapeutiche di noribogaina o analogo placebo, e sono stati tenuti in osservazione per 216 ore. Gli scienziati affermano che non ci sono state reazioni avverse alla noribogaina o al placebo. Ricerche precedenti indicano che anche la noribogaina, come la 18-MC, potrebbe condividere con l'ibogaina la capacità di arrestare i sintomi dell'astinenza e vincere le dipendenze, ma senza effetti collaterali.

Studi tossicologici preclinici non pubblicati della DemeRx finora hanno dimostrato che due settimane di esposizione ricorrente a noribogaina non causano alcuni dei problemi neurologici notati in altri studi: degenerazione delle cellule di Purkinje cerebellari o attivazione della GFAP. La società ha inoltrato domanda negli Stati Uniti per il trasporto della noribogaina entro i confini nazionali, e studi preliminari del nuovo farmaco sono attualmente in corso.

Gli studi di Mash e Glick non sono orientati solo verso i tossicodipendenti, ma anche verso pazienti colpiti da una patologia molto più comune: la depressione. Oggi, uno statunitense su dieci assume antidepressivi; nelle donne tra i 40 e i 50 anni la cifra sale a uno su quattro. Farmaci per il miglioramento dell'umore come la fluoxetina, meglio nota con il nome commerciale di Prozac, agiscono come inibitori selettivi della ricaptazione della serotonina (SSRI) e bloccano il riassorbimento della serotonina da parte dei neuroni. La serotonina è un neurotrasmettitore coinvolto nella trasmissione di messaggi nel cervello; un aumento della serotonina provoca un aumento dell'attività cerebrale, che nei pazienti affetti da depressione si manifesta in un miglioramento dell'umore.

Ma il Prozac e gli altri SSRI non sono sempre efficaci. Secondo uno studio del 2010 pubblicato sul «Journal of the American Medical Association», alcuni placebo hanno avuto lo stesso effetto dei SSRI nella maggior parte delle persone che soffrivano di depressione leggera o moderata. Uno studio del 2006 finanziato dal National Institute of Mental Health ha scoperto che circa il 70 per cento delle persone che avevano assunto SSRI aveva manifestato gli stessi sintomi depressivi dopo 14 settimane. Vari pazienti depressi, su cui i farmaci non avevano avuto effetto, si sono rivolti all'ibogaina per normalizzare il loro presunto squilibrio chimico.

Lex Kogan sostiene che circa l'80 per cento dei pazienti affetti da depressione che si rivolgono alla Envision Recovery smettono permanentemente di assumere SSRI e vivono felici e in salute dopo la cura. Nonostante questa affermazione non goda di supporto scientifico, Kogan afferma che la clinica ha visto un aumento del 300 per cento dei consumatori di SSRI negli ultimi tre anni; oggi questi pazienti sono il 30 per cento dei clienti della Envision. Kogan prevede che i numeri raddoppieranno negli anni a venire. E Glick ritiene che un analogo non tossico dell'ibogaina possa essere un'importante aggiunta all'arsenale contro la depressione.

Domanda e offerta

Alla Envision, quattro giorni dopo aver ricevuto la dose elevata di ibogaina, Mallek si stava affrettando a fare i bagagli per prendere un autobus che l'avrebbe portato a visitare la costa occidentale del Costa Rica: «Vedrò le scimmie, o forse starò in spiaggia, non importa!». Il viso finalmente colorito, era loquace e pieno di energia. «Non desidero farmi, non ho crisi d'astinenza», mi ha detto con un sorriso. «La gente prova a smettere in così tanti modi, e fallisce sempre. Ma questo funziona per tutti. Questa roba è un miracolo».

Mallek si sbagliava. In effetti, l'ibogaina non funziona per tutti. E quella volta non ha funzionato nemmeno per lui. È rimasto sobrio per quattro mesi, poi ci è ricaduto. I pazienti come lui, e il timore dei danni causati dalla sostanza, sono la ragione per cui fino a quando non ci saranno trial clinici randomizzati in doppio cieco praticati in diversi centri, l'ibogaina resterà esclusa dalle terapie contro le dipendenze, relegata in cliniche clandestine. E non si prospettano ricerche così rigorose perché, visti i timori sulla sicurezza della sostanza, è improbabile che le istituzioni governative negli Stati Uniti o in Europa assegnino fondi a queste ricerche. Per parte loro, le case farmaceutiche non hanno mostrato grande interesse verso l'ibogaina a causa degli stessi pericoli, e perché non è facilmente brevettabile.

Eppure l'alto numero di tossicodipendenti che cercano di scacciare i propri demoni con questa sostanza indica che l'ibogaina non è destinata a scomparire presto. Mallek, per esempio, non incolpa l'ibogaina della sua ricaduta, quanto piuttosto le sue debolezze. «Non voglio dire che l'ibogaina restituisca alle persone la vita che hanno perso, piuttosto dà loro la *possibilità* di riprendersi indietro la loro vita», mi ha scritto in un'e-mail. «Ma la libertà è pericolosa senza giudizio». Mallek pensa di aver acquisito un po' di giudizio, almeno per quanto riguarda le sue pecche. Ha in progetto di tornare alla Envision per un nuova terapia. Vuole disintossicarsi, costi quel che costi. ■

PER APPROFONDIRE

Ibogaine in the Treatment of Substance Dependence. Brown T.K., in «Current Drug Abuse Reviews», Vol. 6, n. 1, pp. 3-16, 2013.

Treating Drug Dependence with the Aid of Ibogaine: A Retrospective Study. Ekman Schenberg E. e altri, in «Journal of Psychopharmacology», Vol. 28, n. 11, pp. 993-1000, 29 settembre 2014.

The Anti-Addiction Drug Ibogaine and the Heart: A Delicate Relation. Koenig X. e Hilbert K., in «Molecules», Vol. 20, n. 2, pp. 2208-2220, febbraio 2015.

Noribogaine Reduces Nicotine Self-Administration in Rats. Qing C. e altri, in «Journal of Psychopharmacology», Vol. 29, n. 6, pp. 704-711, giugno 2015.

Il cervello drogato. Nestler E.J. e Malenka R.C., in «Mente&Cervello» n. 9, maggio-giugno 2004.

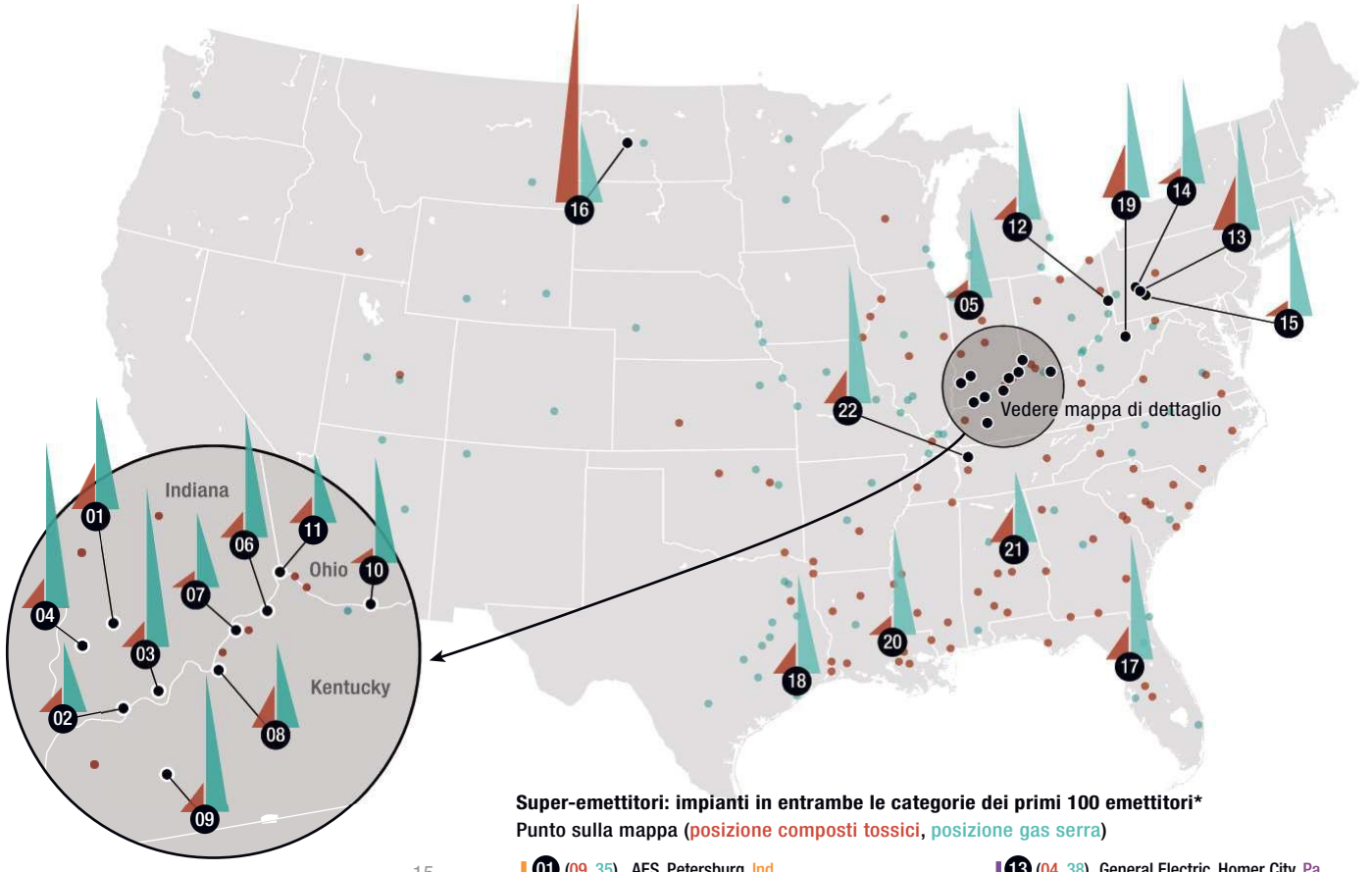
Chi inquina di più negli Stati Uniti

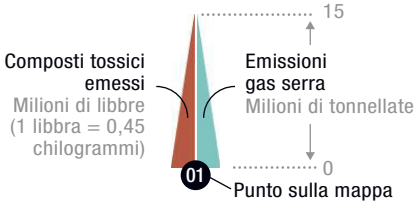
Un piccolo gruppo di impianti emette una porzione enorme di gas tossici e serra

Nel 2014, negli Stati Uniti 100 impianti su 20.000 hanno prodotto un terzo dell'inquinamento industriale che avvelena l'aria del paese. Altri 100 hanno rilasciato un terzo delle emissioni industriali statunitensi di gas serra, su 7000 impianti che scaricano i gas. E secondo un'indagine del Center for Public Integrity che ha prodotto le classifiche, 22 siti «super-emettitori» compaiono in entrambe le liste (*in basso*). Molti sono centrali elettriche alimentate a carbone, e alcune sono in alta classifica perché sono molto grandi. Questo gruppo è responsabile di una quota significativa dell'inquinamento atmosferico di origine industriale negli Stati Uniti.

I ricercatori del Center for Public Integrity hanno anche usato dati di censimenti per mostrare che la maggior parte dei 100 impianti sulla lista tossica si trova in sobborghi poveri, aree cioè in cui i redditi sono più bassi rispetto al reddito medio degli Stati Uniti. La buona notizia è che il risanamento dei siti potrebbe dare un duro colpo ai composti tossici che sono implicati in malattie respiratorie e nel contributo degli Stati Uniti al cambiamento climatico. I ricercatori infine affermano che le norme attuali sono sufficienti, tuttavia la loro debole applicazione deve migliorare parecchio.

Mark Fischetti





- Primi 100 emettitori di composti tossici
  270 milioni di libre (2014)
- Primi 100 emettitori di gas serra
  Oltre un miliardo di tonnellate (2014)
- Super-emettitori

Super-emettitori: impianti in entrambe le categorie dei primi 100 emettitori*
Punto sulla mappa (posizione composti tossici, posizione gas serra)

- 01 (09, 35) AES, Petersburg, Ind.
- 02 (47, 98) Alcoa, Newburgh, Ind.
- 03 (44, 06) American Electric Power, Rockport, Ind.
- 04 (32, 04) Duke Energy, Owensville, Ind.
- 05 (73, 59) Northern Indiana Public Service, Wheatfield, Ind.
- 06 (43, 23) PPL, Ghent, Ky.
- 07 (81, 89) PPL, Bedford, Ky.
- 08 (14, 67) PPL, Louisville, Ky.
- 09 (33, 15) Tennessee Valley Authority, Drakesboro, Ky.
- 10 (83, 44) AES, Manchester, Ohio
- 11 (45, 97) Duke Energy, North Bend, Ohio
- 12 (50, 34) FirstEnergy, Stratton, Ohio
- 13 (04, 38) General Electric, Homer City, Pa.
- 14 (88, 41) NRG Energy, Shelocta, Pa.
- 15 (86, 49) NRG Energy, New Florence, Pa.
- 16 (01, 76) Basin Electric Power Cooperative, Beulah, N.D.
- 17 (25, 21) Duke Energy, Crystal River, Fla.
- 18 (27, 51) Exxon Mobil, Baytown, Tex.
- 19 (05, 27) FirstEnergy, Haywood, W.V.
- 20 (66, 39) NRG Energy, New Roads, La.
- 21 (18, 96) Southern, Wilsonville, Ala.
- 22 (24, 14) Tennessee Valley Authority, Cumberland City, Tenn.

*Non ci sono siti in Alaska o Hawaii

Grafica di Tiffany Farrant-Gonzalez; fonte: *America's super polluters*, di Jamie Smith Hopkins. Pubblicato on line dal Center for Public Integrity, 20 settembre 2016; www.publicintegrity.org/2016/09/29/20248/america-s-super-polluters

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

Il motore impossibile targato NASA

Anche se ha superato le prime verifiche, non è detto che l'EmDrive funzioni davvero

Di inventori di macchine per il moto perpetuo o per la generazione di energia dal nulla è pieno il mondo: l'esperienza, amara e cinica maestra, insegna che fino a prova contraria vanno trattati come dilettanti che si autoingannano nel caso migliore o di professionisti della truffa intenzionale nel caso peggiore. Ma che cosa succede quando arriva la fatidica prova contraria?

È quello che sarebbe accaduto con l'EmDrive, un propulsore inventato da un ingegnere aerospaziale britannico, Roger Shawyer: è stato studiato per anni dal Pentagono e dalla NASA, e un recente articolo scientifico che lo descrive ha superato l'ostacolo del *peer review*, comparendo nelle pagine della rivista «Journal of Propulsion and Power» dell'American Institute of Aeronautics and Astronautics. Siamo insomma lontani dal *cliché* dell'inventore in uno scantinato, che nasconde gelosamente i dettagli della propria scoperta: qui sono pubblicati materiali, metodi, esperimenti e schemi tecnici.

Il problema è che l'EmDrive è in sostanza un propulsore che a quanto pare funzionerebbe senza propellente, violando le leggi fondamentali della fisica perché genererebbe spinta senza emettere massa e limitandosi a far rimbalzare microonde all'interno di una cavità troncoconica chiusa.

Semplificando, è come cercare di muovere la propria auto salendo a bordo e spingendo sul finestrino, dicono gli scettici. Ma se funzionasse davvero sarebbe una rivoluzione per i viaggi spaziali, perché eviterebbe il bisogno di trasportare enormi masse di propellente: un veicolo interplanetario dotato di pannelli solari per alimentare l'EmDrive potrebbe, in teoria, viaggiare per sempre a motori costantemente accesi, raggiungendo velocità straordinarie. Di conseguenza c'è un interesse enorme intorno a questo propulsore. In questa vicenda, inoltre, gioca un ruolo non trascurabile il fascino emotivo dell'idea di un scienziato solitario che sovverte le frustranti limitazioni della fisica, sbugiarda i baroni della scienza e schiude nuovi, radiosi orizzonti.

Ma proprio perché la posta in gioco è così alta occorre tenere i piedi per terra. Il *pedigree* dell'EmDrive è migliore della media, però occorre ricordare che superare la peer review significa semplicemente che degli esperti del settore hanno esaminato l'articolo e hanno confermato la validità dei dati e dei metodi descritti. Non vuol dire che l'invenzione funziona. L'articolo potrebbe anche contenere errori sfuggiti agli esaminatori.

All'EmDrive manca inoltre un altro elemento di conferma basilare: nessuno, finora, è riuscito a riprodurre i risultati pubblicati. Una ricerca cinese del 2012 che sembrava averlo fatto è stata poi ritirata perché si è scoperto che era afflitta da un errore legato alla dilatazione termica, mentre la sperimentazione della NASA del 2014 ha fatto emergere che un esemplare di controllo, che non doveva generare spinta, l'ha fatto lo stesso: un tipico segno di un errore di metodo.

Va detto che le forze in gioco sono piccolissime e difficili da misurare: secondo i nuovi risultati pubblicati, il prototipo di EmDrive genera soltanto 1,2 millinewton di spinta per chilowatt immesso. A questi livelli è necessario usare strumenti che hanno margini d'incertezza elevati, ed esistono vari effetti magnetici, termici ed elettrostatici che potrebbero generare l'illusione di una spinta. Anche la quantità di dati raccolti è insolitamente esigua.

Vale anche qui, insomma, una regola generale spesso dimenticata: la pubblicazione su una rivista scientifica è un passo avanti verso la credibilità di una scoperta, insieme alla trasparenza dei ricercatori, ma non è una garanzia assoluta. Quella non arriverà dai facili entusiasmi dei tifosi, ma dal lavoro paziente e rigoroso di chi farà scetticamente ulteriore sperimentazione.

Un'astronave dotata di un propulsore senza propellente come l'EmDrive potrebbe raggiungere Marte in poche settimane, aprendo la strada a una colonizzazione di massa del pianeta

Cortesia NASA

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Per avere occhi da cerbiatta

Alcuni prodotti per allungare le ciglia sono farmaci, e vanno trattati come tali

Alcune settimana fa, dal parrucchiere, origliavo i discorsi della mia vicina di poltrona che si lamentava per il trattamento di allungamento delle ciglia che le era costato un occhio della testa e non aveva dato i risultati sperati. «La prossima volta uso quel rimedio naturale di cui si parla tanto», spiegava la signora. «Scusi, quale rimedio?», chiedo incuriosita mentre tiro fuori il quadernetto per prendere appunti. «Lo trova su Internet, ormai ne parlano tutti. È un boccettino venduto con un applicatore. È piccolo, ma se ne usa pochissimo. Qualche goccia ogni sera prima di andare a dormire direttamente sulla palpebra. Rafforza le ciglia e le stimola ad allungarsi. Provi e vedrà. Funziona».

Per conoscere l'origine del prodotto promosso dalla signora dobbiamo andare indietro di una ventina d'anni, fino al 1997. In quell'anno, l'«American Journal of Ophtalmology» pubblica un articolo che descrive un effetto collaterale decisamente curioso e inaspettato per un collirio: l'allungamento delle ciglia. Per mettere alla prova l'osservazione, i ricercatori hanno somministrato il farmaco a una novantina di pazienti, ma solo in un occhio, tenendo l'altro come controllo. Alla fine dello studio, le ciglia degli occhi trattati erano più lunghe del 20 per cento di quelle degli occhi non trattati.

Le responsabili sono un gruppo di molecole della famiglia delle prostaglandine, usate come farmaci per la cura del glaucoma. Perché le ciglia si allunghino non è chiaro. I dati raccolti in questi anni fanno presupporre che le prostaglandine agiscano sul follicolo prolungando la fase di crescita del pelo e consentendo, quindi, il raggiungimento di una lunghezza maggiore.

Da questi primi risultati, seppur preliminari, all'annuncio di avere per la mani un rimedio miracoloso, il passo è stato brevissimo. Le aziende hanno iniziato a investire nella ricerca di molecole analoghe e, magari, anche più efficaci di quelle usate fino ad allora. Tra queste, troviamo il bimatoprost, una molecola sintetica, che agisce come le prostaglandine e che, nel 2007, è usata da Jan Marini Skin Research per produrre il primo cosmetico che allunga ciglia: Age Intervention Eyelash.

In realtà, quello che propone Jan Marini è né più né meno che il collirio per la cura del glaucoma. Quanto basta per attivare le antenne della statunitense Food and Drug Administration (FDA) che, infatti, nel novembre dello stesso anno chiede il sequestro immediato dei più di 12.000 flaconi in vendita. La legislazione degli Stati Uniti non permette, infatti, che i principi attivi autorizzati come farmaci siano usati in cosmetica senza un'autorizzazione specifica. In particolare, la preoccupazione della FDA è che le persone già in cura con prostaglandine per il trattamento del glaucoma possano usare il prodotto cosmetico con leggerezza, rischiando danni permanenti al nervo ottico e alla retina.

Il colpo non scoraggia i concorrenti di Jan Marini che, invece, la sfruttano per conquistare terreno. Nel 2008, un'altra azienda farmaceutica, Allergan, decide di far le cose per bene e chiede alla FDA di approvare il bimatoprost anche per uso cosmetico. L'analisi dell'ente statunitense si concentra sulla sicurezza del prodotto, più che sull'efficacia e dopo un anno di lavoro, la FDA approva la messa in commercio del nuovo prodotto cosmetico che prenderà il nome di Latisse e che darà il via a decine di altri prodotti analoghi. Trattandosi, però, di farmaci, sia negli Stati Uniti sia nel nostro paese la vendita è consentita solo in farmacia e solo previa presentazione di una ricetta medica.

L'effetto di allungamento delle ciglia di alcune molecole della famiglia delle prostaglandine è stato scoperto quasi per caso.

Tuttavia, come mi raccontava la signora dal parrucchiere, oggi è possibile aggirare le restrizioni e comprare questi prodotti anche su Internet. Se lo fate, ricordatevi che state maneggiando un farmaco che, per quanto sicuro, può comunque avere effetti collaterali non trascurabili. Sembrerà anche naturale (e non lo è), come diceva la signora. Ma non per questo è innocuo.

malyugin/iStockphoto

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

Danni da congelamento

Il raffreddamento lento dei freezer domestici può rovinare il sapore della carne

L'acqua è di gran lunga la componente principale di quasi tutto quello che mangiamo: carne, pesce, frutta e ortaggi. Tra il 70 e il 90 per cento. Con così tanta acqua e nutrienti a disposizione non stupisce che il cibo sia facilmente preda di microrganismi, ed è per questo che uno dei più antichi modi di conservazione, l'essiccazione, sfrutta il fatto che batteri e muffe non possono proliferare senz'acqua. Con l'avvento di *freezer* e frigoriferi il congelamento, anche casalingo, è il metodo più comune di conservazione degli alimenti, specialmente per carne e pesce. I congelatori casalinghi sono mantenuti solitamente a −19 °C: a queste temperature i batteri sono bloccati e le reazioni chimiche di decomposizione delle cellule sono quasi completamente ferme e gli alimenti, con qualche eccezione, possono essere conservati anche per vari mesi.

Che cosa succede quando si mette un pezzo di carne in freezer? Raggiunta la temperatura di −1 °C, la carne comincia a congelare (l'acqua congela a 0 °C solo quando è pura). Iniziano a formarsi cristalli di ghiaccio che crescono via via che la temperatura scende.

Il modo in cui si forma il ghiaccio è importantissimo. Se il raffreddamento è effettuato molto velocemente, come avviene nell'industria alimentare con l'esposizione di carne o pesce a temperature molto più basse di quelle raggiungibili a casa, si parla di «surgelazione»: in questo caso si formano molto velocemente tanti cristalli di ghiaccio molto piccoli che non hanno il tempo di crescere troppo. Quando la scongeleremo, sarà quasi come se non fosse mai stata surgelata.

Se invece il raffreddamento è lento, come avviene nel congelatore domestico, si formano meno cristalli, ma più grossi. Così facendo danneggiano le cellule, bucandone la membrana. Le conseguenze le vedremo una volta scongelata la carne: i danni prodotti dai grandi cristalli di ghiaccio faranno uscire i succhi della carne, che sarà quindi più asciutta una volta cotta.

Sarà capitato anche a voi di togliere dal congelatore una bistecca o un petto di pollo, congelati crudi, e di notare macchie di colore diverso dove la carne sembra addirittura cotta. Questo fenomeno è dovuto alla disidratazione superficiale della carne: l'aria contenuta nel freezer è particolarmente secca e può disidratarla causando una denaturazione delle proteine simile visivamente a quello che avviene con una cottura. La carne è ancora perfettamente commestibile ma le zone danneggiate saranno dure e asciutte. Se vi trovate nella condizione di dover congelare delle bistecche perché i vostri ospiti vi hanno dato buca e non potete certo mangiarne cinque da soli, potete asciugarle con carta da cucina, depositarle su una teglia di metallo ricoperta con carta da forno e metterle in freezer. Non coprite le bistecche altrimenti ne rallenterete il raffreddamento. Una volta congelate avvolgetele bene, singolarmente, in una pellicola per alimenti e riponetele in un sacchetto da freezer a chiusura ermetica avendo cura di far uscire più aria possibile per ridurne la disidratazione.

Alcuni accorgimenti al momento di congelare e scongelare la carne e possono prevenire gli effetti della disidratazione e salvaguardarne il gusto.

Quando sarà il momento di scongelarle ricordatevi che carne e pesce non devono mai scaldarsi troppo, per evitare proliferazioni batteriche, e che il microonde è da evitare: il ghiaccio non assorbe le microonde e rischiate di cuocere il cibo in alcuni punti a causa della patina di acqua superficiale, che invece le assorbe benissimo. In più il riscaldamento non è mai uniforme. È meglio togliere molte ore prima carne e pesce dal freezer e riporli nel frigorifero, dentro un contenitore per evitare che colino dei liquidi. Se invece avete fretta, la strategia più efficiente è metterli in un sacchetto di plastica con chiusura ermetica, cercando di eliminare il più possibile l'aria contenuta, e scongelare usando un filo di acqua fredda corrente, tenendo il sacchetto immerso in una bacinella.

StockFood/Getty Images

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Le conseguenze della ginnastica

Nel precario equilibrio della comunità composta da tre umani e un felino, il rapporto con l'attività fisica è quanto mai variabile. La gatta, per esempio, sembra evitare ogni forma di allenamento sportivo, quasi come se ogni caloria di energia andasse preziosamente conservata e usata solo in caso di estrema necessità: ciononostante, la tonicità muscolare e i riflessi del soggetto sono oltremodo efficienti, visto che neppure con una videocamera dotata di ultra-slow-motion è mai stato possibile filmare l'atomo temporale in cui riesce a catturare e ingoiare una crocchetta.

Forse per affinità elettiva e affettiva, Alice si trova in una situazione tutto sommato prossima a quella della micia: non disdegna l'idea di provare qualche nuovo sport e quando lo fa solitamente riesce bene, ma non si ha memoria di attività fisica che abbia ripetuto per più di due settimane di fila.

Assai più coerentemente, Doc avrebbe un gran bisogno di muoversi (la sua prestazione sportiva più clamorosa è la vibrazione lamentosa delle corde vocali quando l'ascensore è guasto e il nostro si ritrova nell'angosciosa prospettiva di scalare 23 scalini), ma evita con cura di farlo.

Il dramma vero è che invece Rudy fa sempre ginnastica. La fa preferibilmente nel parco e, per fortuna, quasi sempre in ore antelucane, quando la città dorme e i suoi coinquilini pure; ma capita talvolta che la faccia un po' più tardi, quando i parchi cittadini si popolano di altri esseri umani: e questo è un guaio, perché quasi sempre questi frequentatori di parchi e zone verdi accendono la sua fantasia. Proprio come succede in questa mattina domenicale.

«Curioso», dice infatti appena varca la soglia di casa, grondante di sudore e di efficienza muscolare. «Oggi sembra che tutte le giovani generazioni si dedichino alla stocastica rotazionale».

Non si può dire che l'esternazione susciti particolare entusiasmo, forse perché cade su un pubblico ancora in pigiama, con le cispe negli occhi e un forte bisogno di caffè.

«Mmmh?», risponde qualcuno non meglio identificato (forse Gaetanagnesi).

«Già... Al parco c'era sia un gruppo di adolescenti che coccolavano i loro giovani ormoni con il "gioco della bottiglia", sia un gruppetto di bambini che aspettavano il turno di salire su quelle piccole giostre a sei posti. Curioso è il fatto che sia i timidi tra gli adolescenti sia i più ardimentosi dei bambini speravano la stessa cosa, ovvero un risultato nullo. Gli adolescenti timidi per non essere costretti a baciare qualcuno, i piccoli perché se di fronte a loro si fermava un sedile vuoto potevano salire in giostra».

Le cispe negli occhi resistono, la carenza di caffeina domina. Nessuna reazione vocale dal pubblico: ciò non di meno, Doc compie un errore fatale, allunga la mano verso il vassoio rotante al centro del tavolo e lo ruota quel tanto che serve per afferrare l'ultima *brioche* ancora calda di forno.

«Ecco!», fa Rudy entusiasta. «Questo oggetto riproduce perfettamente la situazione!».

Negli occhi di Alice si accende per un istante un lampo di preoccupazione. Quel vassoio rotante le piace proprio tanto, vorrebbe avere la forza di metterlo al sicuro. Ma è troppo tardi.

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Alla fin fine non è altro che una versione inoffensiva della *roulette* russa», dice Rudy, mentre rimuove sommariamente le briciole di brioche, preleva sei bicchierini da *sakè* da una vetrina e li ripone capovolti sul vassoio rotante, equamente spaziati, come i vertici di un esagono regolare. Preleva quindi una zolletta di zucchero il cui destino originario era quello di sciogliersi in un caffelatte, la mette sotto uno dei sei bicchierini e infine fa girare il vassoio con un gesto deciso.

«Ecco la nostra roulette! Se parifichiamo lo zucchero alla pallottola e il vassoio al tamburo della pistola, immagino che sarai ben contento di non trovare la zolletta sotto il bicchierino che si ferma davanti a te, vero Doc?».

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di febbraio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Stimolato dall'attività sportiva, Rudy inventa un'improbabile roulette russa a base di bicchierini e zollette di zucchero

IL PROBLEMA DI DICEMBRE

Il mese scorso un avventuroso Doc era alla ricerca di carburante nel deserto californiano, e aveva il problema di identificare la benzina contenuta in una sola tanica in un insieme di sei taniche da 15, 16, 18, 19, 20 e 31 galloni, peraltro già destinate a clienti. Il punto topico della soluzione può passare facilmente inosservato: è noto che due soli clienti comprano gasolio, e che il primo ne prende metà del secondo. Questo comporta che il numero totale dei litri di gasolio deve essere un multiplo di tre, visto che tutte le taniche contengono un numero intero di litri.

La somma delle capacità di tutte le taniche è 119, che se divisa per 3, dà resto 2: in termini più matematici, $119 \equiv 2 \pmod 3$. Poiché solo una delle taniche contiene benzina, la tanica della benzina deve essere una che ha una capacità di N litri con $N \equiv 2 \pmod 3$. L'unica tanica la cui capacità abbia questa caratteristica è quella da 20 litri. Le altre conterranno quindi tutte gasolio, e i due acquirenti se le divideranno in ragione di 66 e 33 litri. È quindi evidente che le taniche destinate al primo siano quelle da 15 e 18 litri, mentre l'altro avrà quelle da 16, 19 e 31.

«Mmmh?», risponde qualcuno (probabilmente Piotr).

«Ma certo! Prendi gli esempi che vuoi, dalla giostra dei bimbi alla bottiglia dei ragazzi, dalla roulette russa alla nostra zolletta nascosta sotto un bicchierino; i casi in cui si gira una ruota e si è contenti di non trovare l'elemento cruciale del sorteggio sono tutt'altro che rari. Ed è proprio qui che volevo arrivare, perché questo ci dà l'occasione di complicare un po' la situazione».

«Mmmh!», stavolta il suono è palesemente esclamativo, preoccupato e corale. Non che questo possa bastare a distogliere il matematico fresco di ginnastica dal proseguire sulle perigliose vie delle generalizzazioni.

«Riepiloghiamo, d'accordo? Vassoio rotante con sei bicchierini capovolti equiprobabili. Uno dei sei nasconde una ferale zolletta di zucchero, che equivale a sconfitta, perdita, morte istantanea. La probabilità di sopravvivenza è quindi un placido 5/6, non abbastanza da evitare i sudori freddi durante una vera roulette russa, ma del tutto ragionevole finché l'unico rischio della sconfitta è quello di aumentare un po' la glicemia del giocatore».

Nessuna voce in risposta, neppure mugolii o miagolii: seguendo l'esempio di Gaetanagnesi, Alice e Doc si limitano a cercare di stropicciarsi gli occhi.

«Quindi, rendiamo più interessante la nostra rivoltella caricandola non più con una ma con due pallottole, adiacenti una all'altra». Nel dirlo si allunga a prendere una seconda zolletta di zucchero per metterla sotto uno dei due bicchierini adiacenti a quello già «carico». «Mi pare già di sentirvi... La probabilità sale a 1/3, bla, bla, bla. Queste sono solo ovvietà, perché adesso imponiamo due regole supplementari: innanzitutto, il giocatore deve sopravvivere alla pallottola/zolletta non una sola volta, ma per ben quattro, prima di dichiararsi sopravvissuto, vittorioso e normoglicemico. In più, se sopravvive al primo giro di ruota, prima di affrontare i giri successivi potrà, di volta in volta, scegliere se scoprire anche il bicchierino successivo o far girare di nuovo il vassoio».

«Mmmh?», mugola interrogativamente Alice.

«Infatti, Treccia, stavo per precisarlo: quando dico "bicchierino successivo" intendo dire che esiste un senso preciso di selezione, diciamo antiorario, via. È importante per salvaguardare l'analogia con la rivoltella: scegliere il bicchierino successivo equivale a tirare il grilletto una seconda volta senza girare il tamburo. Pertanto, ecco una strategia da studiare, e preferibilmente passo passo: fatto girare una volta il vassoio rotante, avendo avuto la fortuna di non trovare una delle due zollette di zucchero, come conviene procedere per il secondo passo? Si passa al bicchierino successivo o si rigira il vassoio?».

« Mmmh...», mugola tristemente Doc.

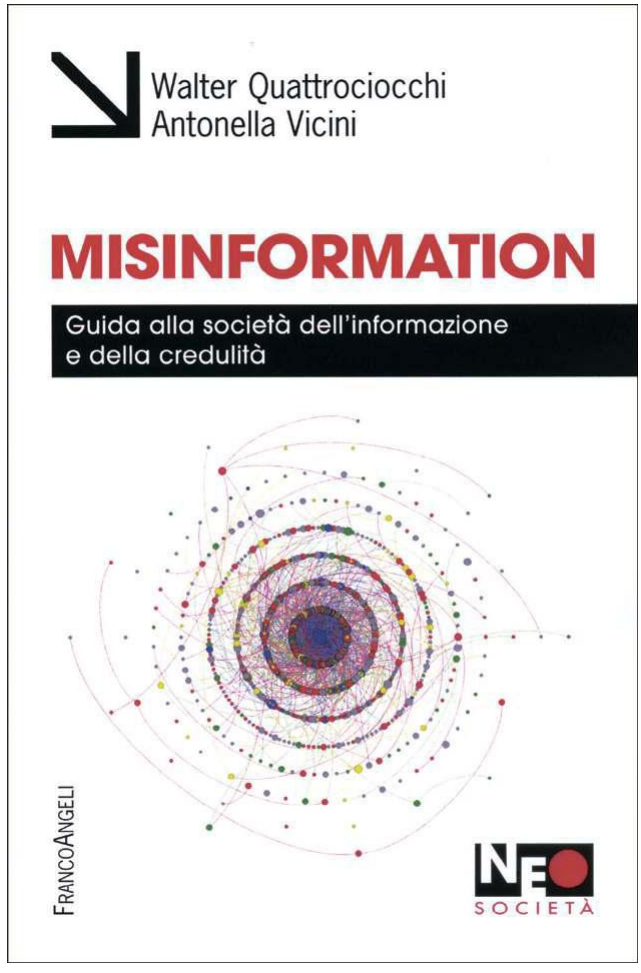
«No, Alice non ha ancora la forza di protestare, non vedi che è appena sveglia? Ma è ovvio che si tratta di calcolare delle probabilità. Non solo, ma visto che il gioco va avanti, perché si devono fare quattro estrazioni, come comportarsi prima della terza? E prima della quarta?».

«Mmmh».

«Gaetanagnesi, insomma! Che fai, suggerisci?», Rudy rimprovera severamente la micia. «Se cominci a dire "Monty Hall" c'è anche rischio che questi due morti di sonno riescano a risolvere il problema! Non prima di una doccia, direi, comunque...».

L'assordante rumore del falso

Misinformation
di Walter Quattrocchi e Antonella Vicini
Franco Angeli, Milano, 2016, pp. 148 (euro 19,00)



Che dire ancora di un best seller ormai consacrato come *Misinformation* di Walter Quattrociocchi e Antonella Vicini? È ormai il libro più citato nelle stanze che contano in Italia: dalle istituzioni ai partiti, dai giornali agli studi radiofonici e ovviamente sulla rete. Ma non è una bolla, né un bluff, è un successo meritato.

Una spinta all'affermazione del saggio l'ha data anche la recente campagna per il referendum, dove finalmente l'Italia che pensa e scrive ha messo a fuoco l'uso della falsificazione propagandistica come mezzo di conquista del consenso e non più come un problema «di Internet», ma come una precisa responsabilità umana e una realtà politica ormai affermata.

Ma c'è molto di più da dire su questo saggio scientifico sui comportamenti in rete. Intanto per la prima volta due autori italiani non partono dalla demonizzazione della rete – ogni tanto qui e là qualche tentazione affiora, ma viene rifiutata – bensì dalla presa d'atto che questo è il mondo in cui ci è dato vivere.

Poi, attraverso l'uso di concetti di psicologia sociale e di statistica per le scienze sociali si descrivono le dinamiche di massa basilari riscontrabili nei *social media*. Scoperte che non sono una novità assoluta, ma lo sono per il pubblico italiano. Certo negli studi degli analisti di marketing è roba che gira da anni ed è stata usata nella vita politica italiana. Ed è un insieme di metodiche che hanno il focus del loro sviluppo negli uffici di Google e di Facebook. Sarebbe bello se Quattrociocchi e i suoi colleghi della Scuola IMT Alti Studi Lucca potessero disporre degli stessi dati e – ipotizzo – della stessa potenza di calcolo che hanno quelli di Mountain View. In ogni caso il merito del saggio è di indicarci come e con quali risultati - nel nostro presente e nel nostro futuro assai prossimo - vengono studiati gli essere umani. Il *Massa e potere,* saggio di Elias Canetti del 1960 (oggi pubblicato da Adelphi), del Duemila è una stanza con vista sulla California, vive di statistica ed è tanto più attendibile in quanto ingoia enormi masse di dati per trarne indicazioni «qualitative».

Dunque Quattrociocchi e colleghi ci spiegano la nostra dimensione individuale dentro il grande fiume dei comportamenti. Che questi risultati siano salutati con sollievo da chi, come i politici italiani, ha vissuto Internet come una maledizione satanica è comprensibile. Abbastanza legittimo sarebbe aspettarsi che Quattrociocchi e i suoi fossero messi in condizione di andare avanti in modo più «istituzionale» , perché la sua attività diventi un flusso costante di informazione.

Ma nessuno si illuda di aver trovato il Servizio Opinioni della Rai anni sessanta o l'Auditel di Internet. Questa partita si gioca altrove e la posta è comprendere come si svilupperanno le applicazioni e i modelli di comportamento «previsti» da parte delle grandi centrali dello sviluppo. Che ormai non sono più soltanto «i padroni del software», come dicono i giornalisti, ma un mondo complesso, che ha a che fare anche con la grande politica: per esempio, che strade prenderà lo sviluppo dell'internet in Cina e in Russia, dove esistono motori di ricerca e «social» da centinaia di milioni di utenti? Come influirà la presidenza Trump sul mondo digitale?

Se pensate che queste cose non abbiano a che fare col nostro discorrere, sarà meglio ricordare che Internet è stata diffusa negli anni nei quali si pensava che la storia fosse finita e che fosse cominciata una lunga era di pace. Oggi le cose sono cambiate: la «*misinformation*» può servire sia a prendere voti sia a mobilitare opinioni pubbliche e a infiammare i cuori per la pace e per la guerra.

C'è una sola obiezione che muoverei a Quattrociocchi e Vicini. Alla fine del saggio sembra quasi che si provino a «dare consigli» su come uscire dalla «camera dell'eco» , per vivere fuori dal rumore assordante della «misinformation». Come si ci fosse un «fuori».

Che cosa c'è «fuori» dal digitale? Esso è la mappa del mondo grande quanto il mondo stesso, il digitale «è» il mondo. Se esci da una *echo chamber* entrerai in un'altra, e «Narciso», che chiude il libro, non vive senza rispecchiarsi.

Vittorio Zambardino

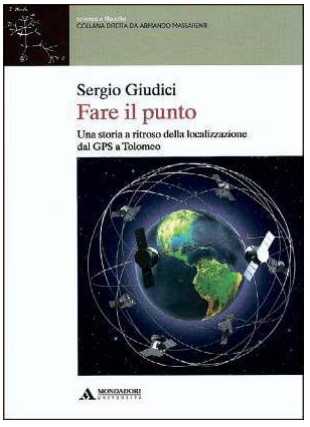
Solo i fatti a proposito delle vaccinazioni

Il vaccino non è un'opinione
di Roberto Burioni
Mondadori, Milano, 2016, pp. 168 (euro 16,50)

Parlare di vaccini separando i fatti – e quindi le prove scientifiche – dalle opinioni: l'intento di Roberto Burioni, medico e professore ordinario di microbiologia e virologia all'Università Vita-Salute San Raffaele di Milano, oltre che nota star di Facebook, è chiaro fin dal titolo. Che forse, per il suo essere così brutalmente diretto, potrà non piacere a tutti, ma risulta efficace per comprendere subito il taglio del discorso. La massa di affermazioni complottistiche sulle vaccinazioni ha creato un rumore di fondo fortemente disorientante per chi non è addentro alle questioni scientifiche, tanto più che una ricerca su Internet rende molto più probabile imbattersi nelle tante pagine pseudoscientifiche che nelle poche che tentano di fare buona informazione. La scelta dell'autore è, quindi, procedere in modo asciutto a un'esposizione chiara, netta e anche piuttosto coinvolgente di ciò che la scienza ha appurato al di là di ogni ragionevole dubbio, facendo opera di decostruzione di tutti i miti che aleggiano sulla pratica vaccinale, coniugando sintesi ed esaustività.
Rispetto alle asperità talvolta mostrate nella pagina Facebook, l'autore adopera un tono più misurato e quindi più efficace dal punto di vista della comunicazione. Difficile dire se un convinto antivaccinista possa lasciarsi persuadere dalle argomentazioni di Burioni: la scienza ci ha insegnato come sia improbabile uscire dalla propria *echo chamber*. Ma il libro sarà senz'altro in grado di rassicurare tanti genitori in dubbio davanti alle scadenze del calendario vaccinale, fornendo loro preziose informazioni che non sempre, incalzati dal tempo, i pediatri riescono a dare nei loro studi. E non è certamente poco.

Anna Rita Longo

Nascita e sviluppo delle tecniche di localizzazione



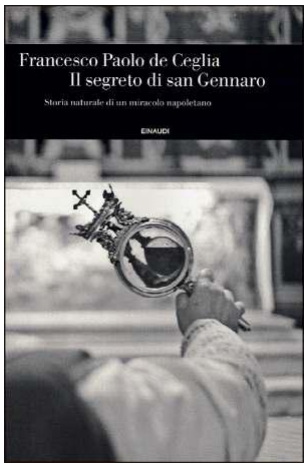
Fare il punto
di Sergio Giudici
Mondadori, Milano, 2016, pp. 148 (euro 13,00)

«Fare il punto». Tutti conosciamo l'espressione. Forse però non sappiamo che si usa nel linguaggio marinaresco, quando si vuole determinare la propria posizione e rispondere così alla domanda: «Dove siamo?» In passato ci pensava il timoniere a fare il punto, compito poi passato all'ufficiale di rotta. Oggi però, sia in mare sia a terra, ci pensa il GPS a dirci dove ci troviamo: basta consultare lo smartphone.
L'idea della localizzazione satellitare nasce negli Stati Uniti nei primi anni della corsa allo spazio, subito dopo il lancio del satellite Sputnik 1 da parte dell'Unione Sovietica. Dopo aver determinato la posizione dello Sputnik raccogliendone i segnali e conoscendo la posizione del ricevitore, i ricercatori statunitensi studiarono subito il problema inverso, vale a dire localizzare un ricevitore sulla Terra conoscendo la posizione di un certo numero di satelliti. Da questo problema di geolocalizzazione nascerà in seguito, sul finire degli anni settanta, il Global Positioning System (GPS).
Tutti usiamo il GPS abitualmente, ma ci siamo mai chiesti come funziona? Se proviamo a «smontarlo» concettualmente ci troveremo dentro molte aree della fisica, dalla meccanica quantistica alla fisica dell'atmosfera, passando anche per la relatività generale. Sergio Giudici, fisico delle particelle presso l'Università di Pisa, ci accompagna così non solo a scoprire il GPS, ma lo usa come punto di partenza per una storia a ritroso della localizzazione. Il volume, agile e di semplice lettura, ci aiuta così a scoprire la ricchezza concettuale del GPS, che può anche diventare uno strumento didattico efficace per insegnare la fisica in modo certamente non convenzionale.

Massimiliano Razzano

I luoghi dove è possibile rivedere le stelle

«E quindi uscimmo a riveder le stelle», scriveva Dante Alighieri nell'ultimo verso dell'*Inferno* della sua Divina commedia. Oggi probabilmente uscendo dagli inferi il sommo poeta le stelle non le vedrebbe affatto a causa dell'inquinamento luminoso, a meno di non trovarsi in una delle aree sempre più rare in cui questa forma di alterazione e contaminazione di origine antropica dell'ambiente non sia presente.
Per trovare queste aree, Dante, o più prosaicamente tutti quelli che vorrebbero contemplare le bellezze del cielo notturno senza il disturbo delle luci, possono sfogliare l'*Atlante mondiale dell'inquinamento luminoso* (libro autoprodotto, 66 pagine, 22,00 euro, può essere acquistato on line su Amazon.com) di Fabio Falchi, presidente dell'associazione CieloBuio e studioso dell'inquinamento luminoso da oltre vent'anni come membro dell'Istituto di scienza e tecnologia dell'inquinamento luminoso (ISTIL) di Thiene. L'atlante nasce dell'intenzione di rendere fruibili su carta le mappe elaborate per *The new world atlas of artificial night sky brightness*, studio pubblicato su «Science Advances» da Falchi e altri ricercatori, tra i quali gli italiani Pierantonio Cinzano e Roberto Frugoni, sempre dell'ISTIL. (*cb*)



Il segreto di san Gennaro
di Francesco Paolo de Ceglia
Einaudi, Torino, 2016,
pp. 426 (euro 32,00)

Il culto di San Gennaro tra storia e scienza

Due ampolle contenenti un liquido non identificato soggetto a singolari passaggi di stato, che la tradizione associa a un *martyr inventus*, un «martire ritrovato», con tutte le incertezze che questa definizione implica. Una figura della quale si sa pochissimo e praticamente nulla di certo, oggetto, però, di un culto con cui una comunità si identifica in modo fortissimo. Una devozione che non teme le insidie della storia e della scienza.

Questo è stato, ed è tuttora per Napoli, san Gennaro e il miracolo del periodico liquefarsi della reliquia che gli viene attribuita. «È presumibile che se un giorno il culto di quel sangue verrà meno, non sarà a causa della ricetta trovata da uno scienziato in camice bianco nel suo attrezzatissimo laboratorio, bensì in ragione di un più ampio mutamento di sensibilità nei confronti di tali forme di devozione»: è la conclusione che Francesco Paolo de Ceglia, storico della scienza all'Università degli Studi di Bari Aldo Moro, trae al termine di questo dotto e accurato lavoro. Sorprende l'ampiezza della ricerca dell'autore, il cui intento sembra anzitutto sondare le origini del culto e le sue numerose reinterpretazioni, riflesso dei mutamenti della società. Il rapporto con la scienza e la chimica si fa più intenso a partire dal XVIII secolo, al quale risalgono i primi tentativi di simulare il comportamento della veneranda reliquia e la sua prodigiosa liquefazione. La storia delle ipotesi che si sono avvicendate dice molto di più della società che le ha concepite che del reale contenuto delle ampolle, dal sacro sorbetto color sangue alle elaborate ricette che trovano spazio nei prontuari chimici.

L'ultima parte del saggio esplora le vicende più recenti del dibattito sulla reliquia, soprattutto a partire dalle polemiche sollevate dall'ipotesi tissotropica di Luigi Garlaschelli. Molto opportunamente de Ceglia osserva come nessuna affermazione possa essere considerata probante senza indagini effettuate secondo i moderni criteri della scienza, che esigerebbero una trasparenza che l'autorità ecclesiastica non ha ancora deciso di abbracciare.

Eppure – come conclude l'autore e dimostra anche il precedente della Sindone di Torino – certamente non ne avrebbe a soffrire il culto, che ha resistito senza scossoni anche al «declassamento» del 1969, quando la festa di san Gennaro divenne memoria locale, facoltativa al di fuori del territorio partenopeo. La scritta «San Genna', fottatenne» fu la risposta che apparve sui muri di Napoli, lapidaria e chiarissima, come una professione di fede.

Anna Rita Longo

La matematica degli dèi e gli algoritmi degli uomini
di Paolo Zellini
Adelphi, Milano, 2016,
pp. 258 (euro 14,00)

Da dove vengono i numeri?

La parola «algoritmo» ormai da tempo è uscita dal linguaggio specialistico (prima matematico, poi anche informatico) per assurgere a termine di dominio più ampio, ben presente nei mezzi di comunicazione e perfino nel vocabolario delle normali conversazioni. Purtroppo, come spesso accade in questi casi, il termine è spesso usato in maniera poco corretta, quando non decisamente a sproposito. Non è certo il caso di questo libro, che riconduce la parola al suo significato più autentico; anzi, è proprio nel dominio strettamente matematico che Zellini, matematico e saggista, sembra voler dotare il concetto di algoritmo di una caratteristica più impegnativa e determinante nell'ambito dell'evoluzione della matematica.

Per sua propria natura – prevalentemente per la sua coerenza interna che le permette di costruire un impianto assai vasto, ma ogni volta giustificato da proposizioni discendenti l'una dall'altra – la matematica offre alla filosofia della conoscenza un numero limitato di questioni; ma sono decisive, e in un certo senso permanenti fin dagli albori della disciplina. È la matematica invenzione o scoperta? I numeri sono dotati di un'esistenza reale, per così dire fisica, o discendono esclusivamente dalle appercezioni con cui il cervello legge il mondo? Sono tutte domande che l'autore ripercorre nel testo, con estrema consapevolezza tecnica, fino al punto di dar senso alla dicotomia del titolo, che fin dall'inizio preannunciava una cesura tra l'aspetto perfetto (forse divino) della matematica pura degli inizi, contrapposto alla sua (quasi incontrollata) crescita attraverso i meccanismi algoritmici e forse per questo prettamente umani.

Viene quasi subito in mente il famoso aforisma di Kronecker («Dio ha creato i numeri interi, tutto il resto è opera dell'uomo»), e di conseguenza nasce la tentazione di leggere il libro come una sorta di sviluppo del tema kroneckeriano. Si tratterebbe certo di una semplificazione eccessiva: Zellini ripercorre infatti tutti i temi cruciali della filosofia della matematica, non solo gli aspetti ontologici: dai paradossi di Zenone agli infiniti di Cantor, fino alla crisi dei fondamenti e all'esplodere della complessità.

È però possibile che la dicotomia di Kronecker possa fungere quanto meno da *fil rouge* per tutta l'opera: la distanza tra la matematica fondamentale, così potente e bella, e i prodotti della sua crescita esponenziale (e inevitabilmente approssimata) sembra restare il tema centrale del libro, quasi come se il successo, anche tecnico, della matematica le avesse fatto perdere, se non proprio l'innocenza, almeno una parte del suo fascino divino.

Piero Fabbri

Quando la Terra si muove

Una conoscenza corretta dei terremoti è un passaggio essenziale per riuscire a passare da una cultura dell'emergenza a una cultura di prevenzione del rischio

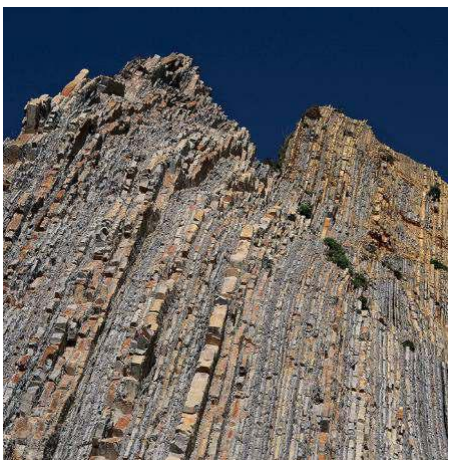
Il fatto che l'Italia sia un paese sismico non dovrebbe fare notizia. Mai. Eppure, ogni volta che la Terra trema, lo stesso disco rotto è messo sul piatto del giradischi nazionale, con i mezzi di comunicazione che vanno a chiedere le stesse cose agli esperti, i politici di turno che fanno le stesse promesse di «mettere in sicurezza», i sopravvissuti che chiedono di non essere lasciati soli. Si ha, cioè, l'impressione che nonostante la storia della nostra nazione sia percorsa fin dall'antichità da terremoti più o meno devastanti, ogni volta il libro debba essere riaperto alla prima pagina e non si abbia mai la forza e la voglia di andare a leggere i capitoli successivi.

La mostra che il Museo civico di storia naturale di Milano ospita in questi mesi cerca con le armi a propria disposizione di promuovere una cultura consapevole del terremoto, perché la conoscenza - la lettura del libro della storia e di quello della scienza - è il primo passo per un comportamento consapevole. Le sette sale occupate dall'esibizione partono dalle cause dei terremoti, spiegando al visitatore la composizione dell'interno del nostro pianeta. Si passa quindi a una sezione sulla dinamica, con la tettonica delle placche, le diverse tipologie di faglie e il loro ruolo nella genesi dei sismi. Ecco, quindi, l'identikit del terremoto, raccontato nelle sue caratteristiche fisiche: le diverse onde sismiche, la loro propagazione e, soprattutto, gli effetti che hanno sui diversi materiali, come per esempio quelli impiegati nell'edilizia. Non manca una parte dedicata ai maremoti, come quelli che abbiamo visto in azione a Fukushima nel 2011 o a Sumatra nel 2004.

Infine, una parte del discorso che spesso è lasciata in secondo piano, ma che invece dovrebbe essere il centro dell'educazione e dell'informazione sul convivere civile: che cosa fare, quali sono i comportamenti da tenere e le corrette modalità di soccorso in caso di terremoto. Quest'ultimo tratto è accompagnato anche dalla presentazione delle ultime novità provenienti dalla Fondazione EUCENTRE di Pavia, il Centro europeo di formazione e ricerca in ingegneria sismica, su come mettere in sicurezza gli edifici che frequentiamo ogni giorno. La speranza è che il visitatore della mostra in futuro non si stupisca più, ma chieda invece che nel nostro paese si passi da una cultura dell'emergenza a una della prevenzione del rischio sismico.

Marco Boscolo

La mostra in corso a Milano approfondisce sia la scienza e la storia dei sismi sia i comportamenti da tenere e le giuste modalità di soccorso quando si verificano.



Dove & quando:

Terremoti
Origini, storie e segreti
dei movimenti della Terra
fino al 30 aprile
Museo civico di storia naturale
Corso Venezia 55, Milano
www.assodidatticamuseale.it.

Cortesia Museo civico di storia naturale di Milano (*tutte le foto, 3*)

La nascita dal caos del sistema solare

di Linda T. Elkins-Tanton

Appena cinque anni fa gran parte degli scienziati riteneva che i corpi del sistema solare si fossero formati seguendo una crescita lenta e progressiva, da particelle minuscole a grandi pianeti. Recenti analisi di meteoriti, residui della nascita del nostro sistema planetario, fanno invece capire che ebbe origine da collisioni caotiche, liquefazioni e ricostruzioni.

Con gli occhi di un bambino

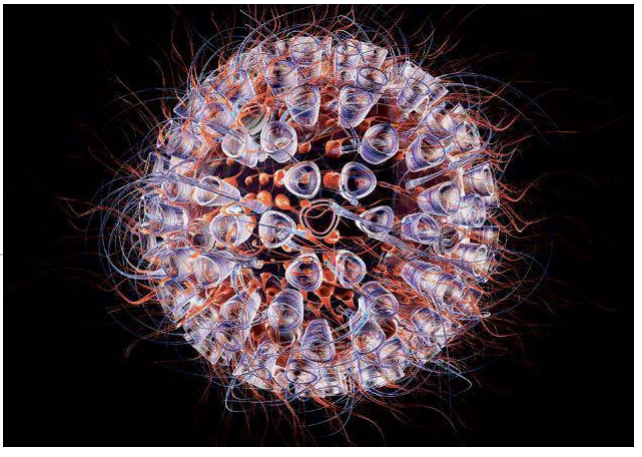
di Orsola Rosa-Salva, Elisa Di Giorgio, Giorgio Vallortigara

Il nostro mondo è popolato di esseri animati il cui comportamento e le cui sembianze sono spesso molto diverse da quelle degli oggetti inanimati. La ricerca sui meccanismi cerebrali innati che ci consentono di distinguerli fornisce nuovi e inaspettati strumenti per la diagnosi precoce dei disturbi dello spettro autistico.

Il tallone d'Achille dell'HIV

di Rogier W. Sanders, Ian A. Wilson e John P. Moore

Dopo quasi vent'anni di tentativi, un gruppo di ricercatori è riuscito a ottenere una proteina sintetica che dovrebbe aiutare a superare le difficoltà incontrate finora nel preparare un vaccino per l'HIV, imitando le proteine del virus abbastanza bene da riuscire a stimolare i giusti anticorpi.



LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Cinzia Sgheri, Ale Sordi (*grafico*), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.
Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - dicembre 2016

Copyright © 2016 by Le Scienze S.p.A.

ISSN 2499-0590

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; *Executive editor*: Fred Guterl; *Managing Editor*: Ricki L. Rusting; *Board of Editors*: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong, David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John Matson

President Steven Inchcoombe;
Executive vice president: Michael Florek;
Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Mauro Capocci: *Speciazione in corso;* Valeria Gili: *Disintossicarsi a ogni costo;* Lorenzo Lilli: *Idee che cambiano il mondo, Le nuove frontiere della fusione;* Alfredo Tutino: *Un nuovo modo di vedere il linguaggio.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
SOMEDIA S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandiclienti@somedia.it

Italia

abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00

Estero

abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8099 del 6/4/2016

Cortesia ASU e Peter Rubin/Iron Rooster Studies (*asteroide*); Westend61/Getty Images (*HIV*)

Y&R

Oggi puoi leggere Le Scienze direttamente su iPad.

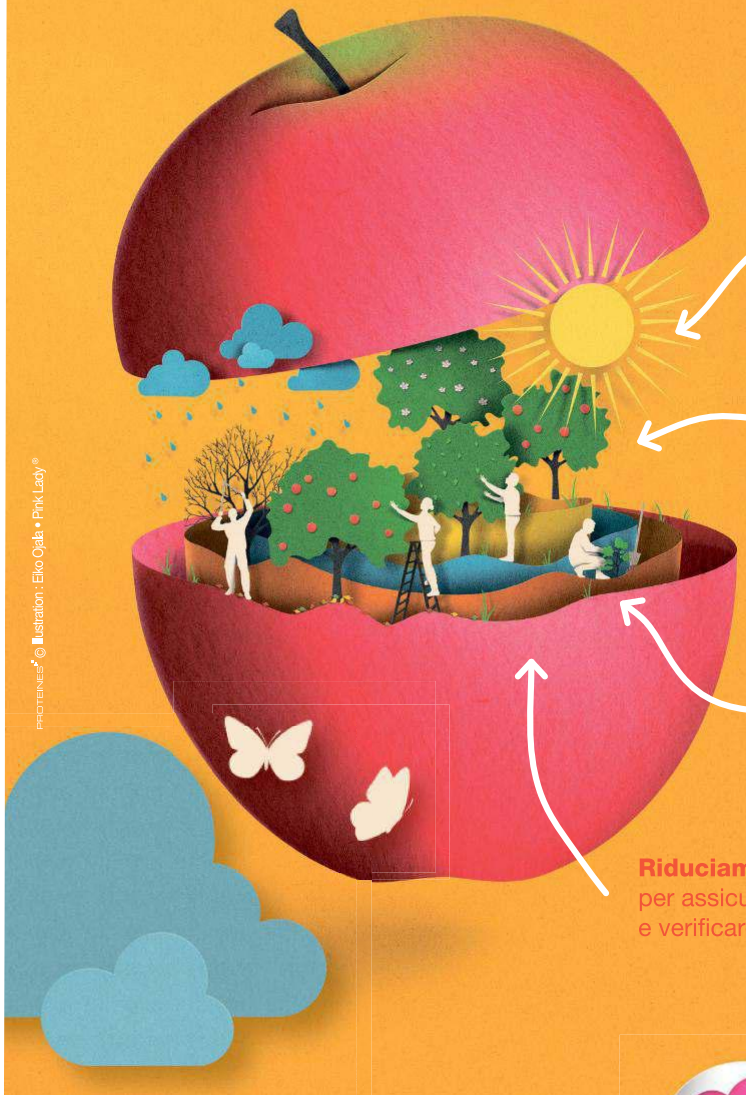
La nuova applicazione disponibile sull'edicola Newsstand di iPad.

Porta Le Scienze sempre con te. Scarica l'applicazione sul tuo iPad e sfoglia i migliori approfondimenti su scienza, tecnologia ed innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista in prova gratuita per 1 mese.

Le Scienze

IN Pink Lady®

CI PRENDIAMO IL NOSTRO TEMPO!



Lasciamo maturare le nostre mele sull'albero da aprile a novembre (il periodo di maturazione più lungo per una mela) affinché possano esprimere tutte le loro qualità.

Ad ogni stagione realizziamo un minuzioso lavoro manuale sui nostri meleti (taglio, sfogliatura...) per favorire il soleggiamento e una crescita armoniosa dei frutti.

In autunno raccogliamo le mele a mano in 3 passaggi per cogliere solo i frutti giunti a perfetta maturazione.

Riduciamo la velocità del confezionamento per assicurare il controllo visivo di ogni mela e verificare la loro qualità ottimale.

Per maggiori informazioni visitate il sito:
www.mela-pinklady.com

La mela che coltiva i suoi valori

PROTEINES © Illustration : Eiko Ojala • Pink Lady®